

# Problemas de hidrometría

## La correlación en las estadísticas de aforo

El aprovechamiento racional de una corriente de agua debe establecerse sobre la base de un conocimiento tan completo como sea posible del régimen de la misma. El aforo directo del tramo de río que ha de ser utilizado proporciona, sin duda, los datos más satisfactorios; pero, generalmente, aquella operación no abarca un período suficientemente largo para comprender todo el probable repertorio de los hábitos de la corriente. Se hace preciso entonces acudir a procedimientos indirectos, sirviéndose de cuantos datos se encuentren que guarden relación con los caudales incógnitos. En las líneas que siguen vamos a explicar los métodos seguidos para extender los aforos practicados por la Sociedad Hispanoportuguesa de Transportes Eléctricos («Saltos del Duero»), al objeto de estudiar un aprovechamiento de las aguas del río Esla.

*Relación entre los aforos de dos estaciones próximas sobre una misma corriente.*—Los caudales que ingresan en el embalse regularizador del aprovechamiento referido se miden en la estación de aforos llamada de Muelas, número 4 de las de la Sociedad. Tal estación se situó tan próxima a la instalada anteriormente en el mismo río por la División Hidráulica del Duero, denominada de Ricobayo y señalada con el número 84, cuanto lo permitió la satisfacción de los requisitos exigibles a una sección de aforo. El tramo de río que media entre ambas estaciones, de unos 2 km de longitud, no recibe ningún afluente; por tanto, puede afirmarse que circulan por aquéllas los mismos caudales. Los aforos practicados en Muelas son de mayor garantía que los efectuados en Ricobayo<sup>1</sup>, y, de otra parte, éstos no cubren toda la carrera del nivel del río; es, pues, deseable formar una curva de caudales de la sección de Ricobayo, que permita traducir a caudales—suficientemente aproximados—las alturas leídas en tal escala antes de ser instalada la estación de Muelas.

Las lecturas simultáneas de las dos escalas corresponden muy próximamente a un mismo caudal, pues, como queda indicado, entre ellas no experimenta sensible alteración el régimen de la corriente, y las variaciones que ésta sufre aguas arriba de las estaciones no son generalmente de valor apreciable durante el período requerido por el tránsito del agua desde la una a la otra. Y si el registrador de niveles existente en una de las estaciones acusa cambios bruscos de régimen, no es difícil apreciar discretamente o calcular la oportuna corrección. Con una serie suficientemente amplia de pares de lecturas simultáneas se ha dibujado una curva que da las alturas de escala de Muelas en función de las de Ricobayo; y eliminando las alturas de Muelas mediante tal curva y la de caudales de dicha estación, se ob-

tiene, finalmente, la que expresa los caudales en función de las alturas de escala de Ricobayo.

Por este procedimiento se han conseguido los aforos del río Esla, en el tramo que interesa, hasta el 1.º de enero de 1916, fecha en que comienzan las lecturas de la escala de Ricobayo, según las publicaciones del Servicio Central Hidráulico. Examinando estas publicaciones hemos visto que la estación más próxima a la nuestra de Muelas con datos anteriores a 1916 es la de Riaño, señalada con el número 67, cuya historia arranca del 1.º de enero de 1913, y al objeto de extender nuestros aforos a los años 1913-16 hemos buscado una relación entre los caudales de Riaño y los de Muelas.

Hemos limitado la investigación a los meses de junio a noviembre porque nos importa esencialmente conocer la aportación del río durante el período de regularización de un embalse que se destina a suplir solamente deficiencias estacionales—de estiaje<sup>1</sup>—.

Desgraciadamente, la serie de Riaño no es completa. Las observaciones hechas desde 1.º de enero de 1914 hasta 22 de julio de 1916 han sido anuladas oficialmente<sup>2</sup>. Esta deficiencia, si no se subsana, reduce a solo un año—el 1913—el período aprovechable de Riaño para extender los aforos de Muelas. En busca de los datos anulados hemos investigado la relación entre los caudales de Riaño con los registrados en otras estaciones de cuencas próximas a la correspondiente al Esla en tal sección. Las estaciones de la División Hidráulica del Duero utilizables con tal objeto son: número 38, llamada Velilla de Guardo, en el río Carrión; número 70, llamada La Robla, en el río Bernesga, y número 75, llamada La Magdalena, en el río I, una.

*Curvas de caudales en papel logarítmico.*—Para aprovechar los datos oficiales de aforos es indispensable rectificarlos previamente, a fin de darles la homogeneidad que no tienen. Los caudales de todos los años, en cada estación, no proceden de una misma curva de caudales, sino que ésta se va perfeccionando cada año a medida que se efectúan nuevas mediciones de gastos, las cuales, por su parte, merecen mayor garantía a partir del momento en que los flotadores fueron sustituidos por los molinetes. Las curvas de caudales correspondientes a las más modernas observaciones no se pueden aplicar a las lecturas de escala más antiguas sin comprobar si el cero de las escalas ha permanecido inalterable, y si así no

<sup>1</sup> Una moderna y documentada ilustración de un embalse de regularización *interanual*, con explicación de la diferencia entre este tipo de embalse y el aludido en el texto, se encuentra en un artículo publicado en el número de enero de 1928 de «Ingeniería y Construcción», titulado «El pantano del Guadalquivir en el Tranco», debido a nuestro distinguido compañero D. Antonio del Águila.

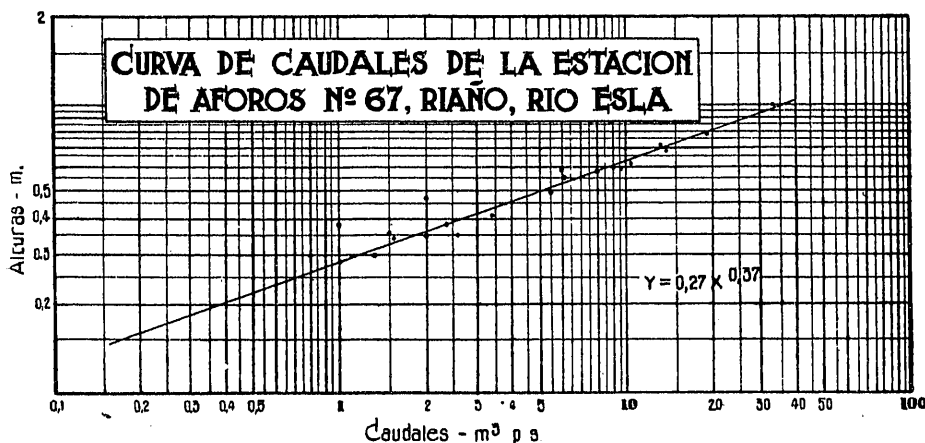
<sup>2</sup> Hemos recogido esta interesante noticia en la breve pero sustanciosa Memoria del anteproyecto del Embalse de Bachende, formado por el ilustrado Jefe del Cuerpo de Ingenieros de Caminos D. Bienvenido Oliver.

<sup>1</sup> La estación de Ricobayo no tolera la medida, con suficiente aproximación, de las velocidades de la corriente. Por ello fué abandonada por la División Hidráulica del Duero.

ha sido es preciso realizar las oportunas correcciones. También debe averiguarse si la sección del río no ha experimentado cambios que alteren la relación entre caudales y alturas de escala, pues las fechas en que estos cambios se producen limitan el período en que es aprovechable cada curva de caudales.

Para definir gráficamente las curvas de caudales

Fig. I.



hemos utilizado el papel llamado logarítmico, que tiene sus coordenadas divididas según una escala logarítmica. En este papel las curvas de caudales suelen presentarse en forma rectilínea, pues su traducción analítica mediante una ecuación exponencial da en general resultados suficientemente aproximados. La figura 1.<sup>a</sup> representa la curva de caudales de la estación de Riaño. Se aprecia que las observaciones practicadas, teniendo en cuenta el error a ellas inherente, se aproximan satisfactoriamente a una línea recta. Las ventajas de este procedimiento son que una recta se ajusta a las observaciones (mediante el método de mínimos cuadrados, el de correlación u otro semejante) más fácilmente que una curva, y que para interpolaciones y extrapolaciones la recta, expresada analíticamente, da más sencilla y sistemáticamente los valores deseados que una curva de ecuación complicada o desconocida.

estado I se expresan los coeficientes de correlación encontrados para los caudales de cada uno de los meses comprendidos desde junio a noviembre. Se observa que, en los tres casos examinados, la correlación es muy exigua en los meses estivales de julio, agosto y septiembre, con la excepción, sin duda casual, de septiembre en la estación 75, a la cual corresponden en conjunto las correlaciones más deficientes. Octubre da los coeficientes más elevados, siguiéndole noviembre, si bien en este mes la estación 75 acusa una correlación muy baja. Junio sólo tiene buena correlación en la estación 70, cuyos coeficientes son en conjunto los de mayor cuantía. No es difícil buscar plausible explicación de estos resultados. En el mes de octubre, en las cuencas estudiadas, los caudales proceden en buena parte de las lluvias, cuya cantidad no difiere marcadamente de una a otra cuenca. Lo mismo ocurre generalmente en los comienzos de noviembre; pero hacia su final los caudales son muy influenciados por las temperaturas, que determinan la proporción

entre precipitaciones líquidas y sólidas. Los caudales en los meses de estiaje, con lluvias nulas o escasísimas, proceden de los deshielos y de las reservas subterráneas, que son factores de más significada individualidad que las lluvias.

No siendo posible determinar los caudales mes por mes, y no siendo indispensable lograrlo al objeto de calcular regularizaciones que invariablemente afectan a los meses comprendidos entre julio y octubre, hemos investigado las correlaciones correspondientes a las sumas de los caudales de dichos cuatro meses, obteniendo los coeficientes que expresa el estado I, al lado de los relativos a las sumas de los caudales de los seis meses comprendidos entre junio y noviembre, determinados en previsión de comprobaciones y rectificaciones. Los coeficientes para julio-octubre acusan correlaciones bastante estrechas en las tres estaciones; para el total de los seis meses,

ESTADO I

Coefficientes de correlación entre los caudales observados en la estación número 67, Riaño, en el río Esla, y los correspondientes a otras estaciones situadas en cuencas próximas

ESTACIONES	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Julio-octubre	Junio-noviembre
38, Velilla de Guardo (Carrión) ...	0,240	0,204	0,423	0,383	0,861	0,602	0,873	0,799
70, La Robla (Bernesga) .....	0,654	0,382	0,104	0,496	0,917	0,671	0,812	0,757
75, La Magdalena (Luna) .....	0,024	0,320	0,413	0,750	0,721	0,003	0,838	0,393

Con las curvas así formadas se han calculado los caudales correspondientes a las lecturas de escala de las estaciones de la División Hidráulica del Duero números 67, 38, 70 y 75 en el período 1913 a 1927, con objeto de investigar la correlación entre los caudales de la 67 con los de cada una de las otras tres.

Correlación entre los aforos de estaciones pertenecientes a cuencas diferentes pero próximas.—En el

la 75 tiene coeficiente más bien bajo, mientras que los de las otras dos estaciones son regularmente elevados. Aunque las correlaciones individuales en los meses de estiaje, con la excepción de octubre, sean bajas, por los motivos antes indicados, no es extraño que ocurra lo contrario con las correlaciones entre los caudales totales de estiaje—julio-octubre—, pues éstos son gobernados, en buena propor-

ción, por la precipitación total en el año meteorológico, cuya medida específica no difiere sensiblemente en las cuencas próximas.

Del examen del estado I se deduce que la única estación correlacionada coherentemente con la de Riaño desde junio hasta noviembre es la número 70, llamada La Robla, en el río Bernesga. Además, el cálculo de los caudales de Riaño, partiendo de los de

ción, obteniéndose así las demás cifras en negrilla del estado II, que son ya los resultados definitivos.

En todo trabajo estadístico es indispensable calcular los errores con que se trabaja. La fórmula clásica del error en el coeficiente de correlación es  $\frac{1-r^2}{\sqrt{n}}$ , siendo  $r$  el coeficiente de correlación y  $n$  el número de términos de la serie. Aplicada al

ESTADO II

Caudales correspondientes a la estación número 67, Riaño, Esla, deducidos por correlación de los observados en la estación número 70, La Robla, Bernesga

AÑOS	Junio	Julio a octubre	Noviembre	Sumas	Junio a noviembre	Diferencias
1914	817	524	664	2.005	1.890	115
	<b>795</b>	<b>506</b>	<b>646</b>	<b>1.947</b>	<b>1.947</b>	0
1915	905	861	973	2.739	2.623	116
	<b>887</b>	<b>840</b>	<b>953</b>	<b>2.680</b>	<b>2.680</b>	0
1916	463	518	1.844 (1)	2.825	2.707	118
	<b>441</b>	<b>487</b>	<b>1.844</b>	<b>2.772</b>	<b>2.772</b>	0

(1) Este caudal es de los observados en Riaño y, por tanto, no ha sido calculado por correlación.

las otras dos estaciones—Velilla de Guardo y La Magdalena—conduce a resultados incompatibles con los proporcionados por La Robla. Estas circunstancias obligan a preferir y utilizar únicamente los datos de La Robla, cuya mejor correlación con Riaño es lógica consecuencia de la mayor proximidad y semejanza de las respectivas cuencas.

En el estado II se consignan con tipo ordinario los caudales de Riaño, deducidos de los de La Robla, mediante las correspondientes ecuaciones de regresión. Se han calculado solamente los caudales de los meses de junio y noviembre y los de los períodos julio-octubre y junio-noviembre, que tienen coeficientes de correlación mayores que 0,500, y se ha prescindido de hallar los caudales de octubre, a pesar de su elevada correlación, por no ser interesante su conocimiento en nuestro caso, si, como acaece, no es posible determinar los caudales de cada uno de los meses intermedios del período de regularización. Los caudales de junio-noviembre concuerdan satisfactoriamente con las sumas de junio, julio, octubre y noviembre—también consignadas en el estado II—, puesto que las mayores discrepancias relativas exceden muy poco del 6 por 100. La compensación de estas diferencias se ha hecho obteniendo medias *pesadas* con los coeficientes de correlación de las cantidades que intervienen; tales medias figuran escritas en el estado II con tipo de negrilla en las columnas de sumas y de junio a noviembre. Las diferencias entre las dos cifras de cada año consignadas en la columna de sumas se han compensado entre los sumandos antes calculados, repartiendo cada una de ellas proporcionalmente a los productos de cada sumando por su correspondiente coeficiente de correlación

menor coeficiente de correlación que hemos manejado—0,654—se obtiene un error de 0,172, contenido menos de cuatro veces en aquel coeficiente, cuya exactitud es, en consecuencia, pequeña, con

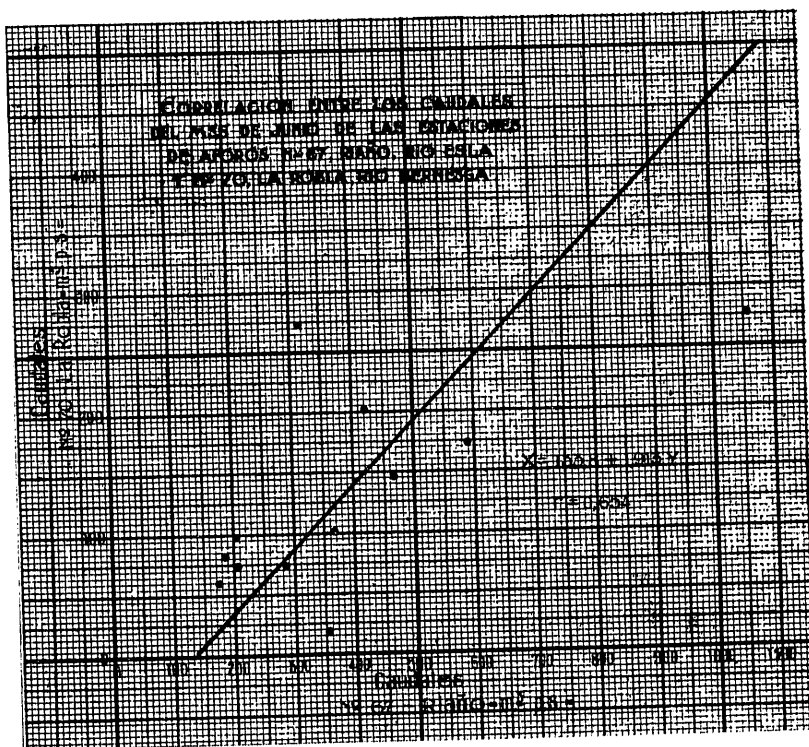


Fig. 2.ª

arreglo a este criterio. Pero la fórmula anotada es aplicable solamente a series de gran cantidad de términos con distribución normal, circunstancias que no se encuentran en las series de nuestro caso. Para las pequeñas series, R. A. Fisher, siguiendo a «Student», ha propuesto que la prueba del coeficiente de correlación consista en calcular la probabilidad de que por azar resulte tal coeficiente entre universos

no correlacionados. Para el coeficiente antes examinado—0,654—tal probabilidad es de 0,03, lo que su-

*misma corriente.*—Para obtener los caudales de Mue- las en función de los de Riaño se ha acudido igual- mente al método de corre- lación, aplicándolo a los cau- dales de junio, julio a octú- bre, noviembre y junio a no- viembre. Los correspondien- tes coeficientes de correla- ción son: 0,832, 0,839, 0,813, 0,809, mayores, en general, que los manejados en el caso anterior, teniendo, por consiguiente, un nivel de significación más elevado. Los caudales deducidos de las ecuaciones de regresión y los de éstos derivados mediante correcciones análogas a las anteriormente explica- das, se consignan en el es- tado III. Las diferencias compensadas alcanzan un máximo del 2 por 100.

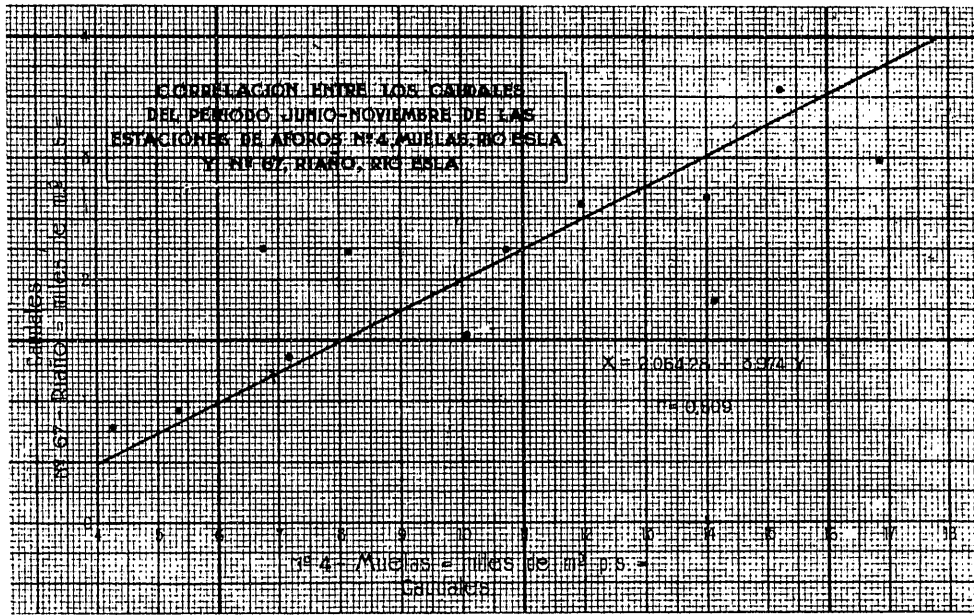


Fig. 3.<sup>a</sup>

pone un *nivel de significación* satisfactoriamente elevado.

En la figura 2.<sup>a</sup> se representan las series de junio y su correspondiente ecuación de regresión, pudiendo

figura 3.<sup>a</sup>, se acomoda muy aproximadamente a la ley lineal. Se debe siempre comprobar si la correlación sigue la ley lineal o, por lo menos, no tiende a preferir otra forma, pues sólo así se está autorizado

**ESTADO III**

**Caudales correspondientes a la estación número 4, Muelas, Esla, deducidos por correlación de los caudales de la estación número 67, Riaño, Esla**

AÑOS	Junio	Julio a octubre	Noviembre	Sumas	Junio a noviembre	Diferencias
1913	2.328	9.277	7.932	19.537	19.156	381
	2.305	9.184	7.855	19.344	19.344	0
1914	3.997	1.942	3.898	9.837	9.802	35
	3.990	1.938	3.891	9.819	9.819	0
1915	4.356	3.375	5.087	12.818	12.715	103
	4.339	3.362	5.068	12.769	12.769	0

apreciarse que la correlación, si bien no sigue muy próximamente la ley lineal, tampoco parece preferir otra forma.

*Correlación entre los aforos de estaciones sobre una*

a utilizar como ecuación de regresión una línea recta. Si la correlación adopta otra forma, el problema es también abordable, pero mucho más complicado.

**Ricardo RUBIO**  
Ingeniero de Caminos

## Un nuevo puente sobre el río Tajo en Serradilla (Cáceres)

Para continuar la lista de los puentes construídos sobre el río Tajo, voy a describir el último que ha sido abierto al tráfico.

El Ayuntamiento de Serradilla me encargó, en mayo de 1926, el proyecto de un puente sobre el río Tajo para sustituir la barca de paso que desde tiempo inmemorial hacía el intenso servicio de co-

municaciones entre las dos partes en que el río divide su fértil término municipal.

Era esta obra de importancia capital para la vida de Serradilla, y su Ayuntamiento (modelo de administración) no vaciló en emprenderla con sus propios recursos, sin subvención de ninguna clase y con un entusiasmo, digno de ejemplo, igual al que había