

Relación entre las características físicas e hidrográficas de una cuenca¹

José Llamas

Université Laval, Faculté des Sciences, Québec, Canadá

Iñaki Antigüedad

Universidad del País Vasco,

Facultad de Ciencias, Bilbao, España

Daniel Alain

Hydrogeo Canada, Montreal (Québec), Canadá

Jesús García

Diputación de Bizkaia, Bilbao, España

Carlos Díaz

Université Laval, Québec, Canadá

El objetivo de este trabajo es la búsqueda de una relación simple y estable entre ciertas características físicas, fácilmente localizables en mapas topográficos, de una cuenca y su hidrográfico medio anual. El factor elegido para definir las características físicas es el polígono de frecuencias de la longitud de los cursos de agua, mientras que como factor hidrológico se ha considerado el hidrográfico medio de un año o de un cierto número de años. Para el análisis estadístico se eligieron, en primer lugar, ocho cuencas del tipo nórdico de la Provincia de Québec, y siete del País Vasco ausentes de toda nórdicidad. En todos los casos, el hidrográfico elegido fue el hidrográfico medio anual correspondiente a un año hidrológico de características medias (1974-1975). El estudio se completó, en segundo lugar, para una media de 10 años, con 16 cuencas del tipo 1 (nórdicas) y 5 de tipo 2, ausentes de toda nórdicidad, dando, en ambos casos, resultados muy satisfactorios.

Introducción

La respuesta de una cuenca a un conjunto de precipitaciones depende, por una parte, de las características de la lluvia (intensidad, duración, frecuencia, etc.) y por otra, de las particularidades físicas, morfológicas y geológicas de la cuenca. Varios ensayos fueron hechos en el pasado para comprender las relaciones existentes entre estos dos tipos de parámetros y poder elaborar modelos simples que expliquen el fenómeno lluvia-caudal mediante funciones de transferencia, fácilmente utilizables en un vasto espectro de condiciones reales. El hidrográfico unitario, los modelos fisiográficos y los modelos matemáticos son ejemplos de esta técnica.

Existen, sin embargo, dos dificultades mayores cuando se adopta este tipo de tecnología; la primera

es que si el número de parámetros es grande se pierde de inmediato, en el proceso matemático, el sentido del fenómeno físico, que es reemplazado por esquemas matemáticos sin significado real. La segunda dificultad proviene del hecho de que, a causa de la función global de transferencia, es imposible relacionar parámetros individuales de cada uno de los sistemas para detectar las relaciones entre las características de la cuenca, por ejemplo, y las del hidrográfico de salida.

El objetivo de este trabajo es, pues, la búsqueda de una relación estable entre la forma de la red de drenaje de una cuenca, definida por la función de densidad de probabilidades de sus canales de flujo, y la respuesta de esta cuenca a las condiciones climáticas, definida por su hidrográfico residual medio anual.

Esta relación podría eventualmente utilizarse para elaborar una técnica regional que permita estimar la respuesta hidrológica anual de una cuenca con el sólo conocimiento de sus características físicas.

Metodología

En cada una de ocho cuencas de la Provincia de Quebec (Canadá), se ha obtenido, por una parte, el hidrograma medio anual, correspondiente al año hidrológico 1974-1975, (según el Anuario Hidrológico AH.16 del Ministerio de Riquezas Naturales de Quebec) y, por otra parte, las funciones de densidad de probabilidad de las longitudes de los cauces, medidos en mapas topográficos a escalas adecuadas. Se eligió el año 1974-1975 a causa de ser un año hidrológico medio.

Esta misma información, correspondiente a siete cuencas del País Vasco (España), fue obtenida de la Confederación Hidrográfica del Norte de España e Iberduero, para el mismo periodo.

Para completar el estudio, eliminando las fluctuaciones interanuales, se consideró también el caso en que el hidrograma fuese el medio anual, durante un periodo de 10 años consecutivos; se utilizó aquí, para el análisis estadístico, una muestra de 16 cuencas en Quebec y 5 en el País Vasco (véase cuadro 1).

1. Parámetros de las cuencas estudiadas

Nombre	Estación	Area km ²	C _H Longitud de cauces	C _H 1 año Hidrograma residual medio	C _H 10 años
Quebec					
Portneuf	50701	355	5.56	10.81	10.013
Petite					
Cascapedia	10901	1390	6.40	9.72	8.530
Du Sud	23106	821	5.68	—	8.350
York	20401	1010	6.06	8.96	8.908
Trois					
Pistoles	22301	958	5.86	8.52	8.818
Coulonge	41301	5150	7.74	7.32	7.214
Chaudiere	23402	5830	7.48	6.74	6.839
Romaine	73801	13000	8.17	6.07	6.163
Etchemin	23301	1130	6.34	—	8.270
Beaurivage	23401	707	5.55	—	9.052
Famine	23422	686	5.84	—	8.921
Nicolet S-O	30101	544	5.99	—	9.457
Massawippi	30220	619	5.98	—	10.038
Eaton	30234	642	6.12	—	9.372
Yamasaka	30302	1270	6.33	—	8.640
Noire	30304	1470	6.41	—	8.745
Godbout	71401	1570	6.53	8.72	—
País Vasco					
Oartzun	107	38	3.46	9.34	9.400
Herrerías	175	247	5.16	8.63	8.200
Ibaizabal	164	256	5.32	7.75	7.850
Deba	103	450	5.86	7.17	7.390
Bidasoa	106	716	6.28	6.47	6.860
Urkiola	—	37	3.29	14.48	—
Urola	109	303	5.33	7.24	—

La razón de llevar por separado dos estudios paralelos en dos regiones hidrológicamente distintas es poder comparar los resultados en función precisamente de estas diferencias fundamentales. Las dos regiones difieren, en primer lugar, por las superficies de sus cuencas, siendo las de Quebec significativamente mayores, y en segundo, por el hecho de que, siendo el origen de una parte importante del hidrograma quebequense la fusión de nieve, este hidrograma es, por lo general, mucho más liso y alargado en el tiempo que el de las cuencas del País Vasco.

Queriendo comparar algunas características físicas de la cuenca con su respuesta hidrológica, sólo se ha considerado el hidrograma residual (véanse ilustraciones 1 y 2), separado el total anual por el método logarítmico (Llamas, 1978).

Para detectar y cuantificar la dependencia eventual entre estas dos poblaciones, se ha retenido el parámetro comparativo:

$$C = \ln \left(\frac{K \cdot A_{m\acute{a}x}}{S^2} \right) \quad (1)$$

donde:

K es un parámetro de superficie cuyos valores son:

$K = 1$ en el hidrograma

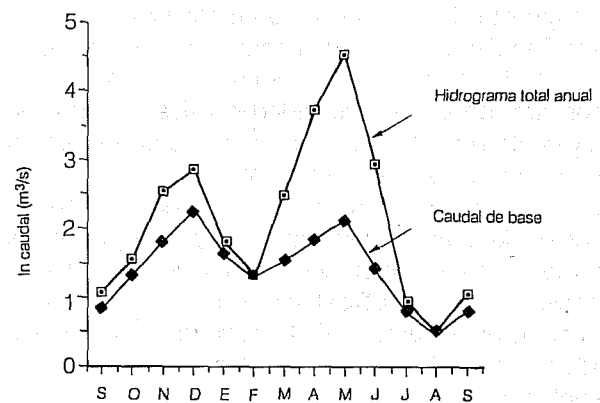
$K = B$ en el polígono de frecuencias de las longitudes de ríos

B es la superficie de la cuenca, en km²

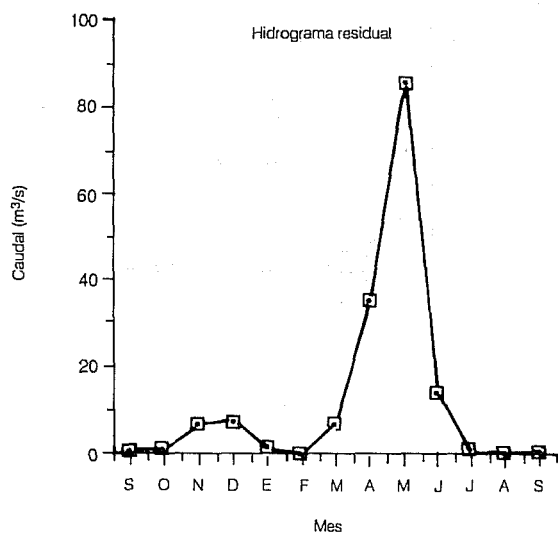
$A_{m\acute{a}x}$ representa la moda del hidrograma y la del polígono de frecuencias y

S representa el área bajo cada una de las curvas.

1. Separación del hidrograma total anual del río Trois Pistoles (Quebec, Canadá). Año 1974-1975



2. Río Trois Pistoles, Quebec. Hidrograma residual (1974-1975)



Este parámetro, para $K = 1$, se ha utilizado ya en el pasado para concentrar la información hidrológica (Rogers, 1972).

En cuanto a la longitud de los cauces, el parámetro toma la forma siguiente:

$$C = \ln \left(\frac{B A_{m\acute{a}x}}{S^2} \right) = \ln(B A_{m\acute{a}x}) - 2 \ln S \quad (2)$$

Para este análisis se ha elegido el histograma de frecuencias relativas, (véase ilustración 3) sea $C = C_{fr}$, en cuyo caso,

$$A_{m\acute{a}x} = f_{m\acute{a}x} = n_{m\acute{a}x}/N$$

$n_{m\acute{a}x}$ = número de clases en la moda de histograma,

N = número total de clases en el histograma,

S = suma de las frecuencias del histograma = 1

$$C_{fr} = \ln(B A_{m\acute{a}x}) = \ln \left(\frac{B n_{m\acute{a}x}}{N} \right) = \ln \left(\frac{n_{m\acute{a}x}}{D} \right) \quad (3)$$

siendo D = la densidad hidrográfica de la cuenca = N/B

En el caso del río Trois Pistoles, el valor de este parámetro es:

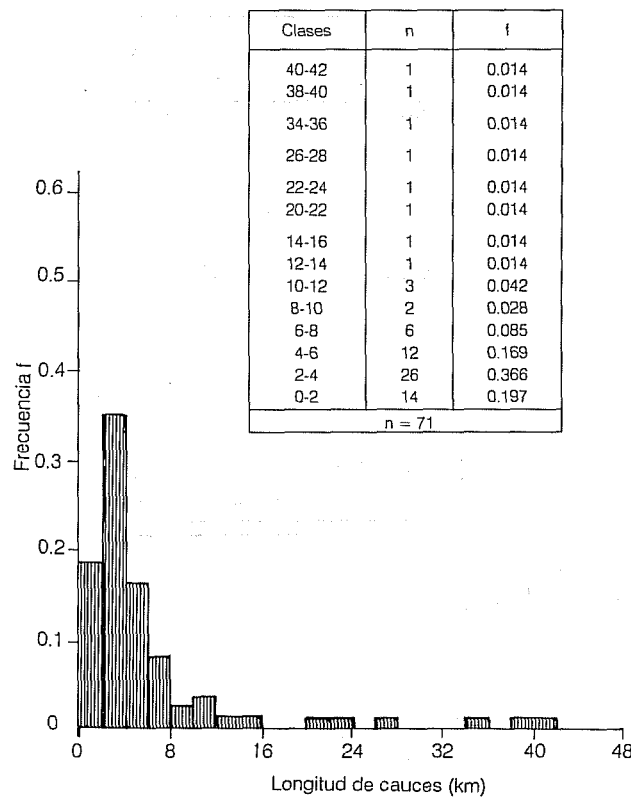
$$C_{fr} = \ln (26/0.074) = 5.86$$

En cuanto al hidrograma residual medio anual, el parámetro es:

$$C_H = \ln \left(\frac{A_{m\acute{a}x}}{S^2} \right) \quad (4)$$

teniendo los símbolos el mismo significado que antes, es decir:

3. Histograma de las longitudes de cauces. Río Trois Pistoles (Quebec, Canadá)



$A_{m\acute{a}x}$ = moda del hidrograma (en unidades de flujo)

S = área bajo el hidrograma (en unidades del volumen: m^3/s mes 10^{-3})

Para el río Trois Pistoles, en particular, los resultados fueron:

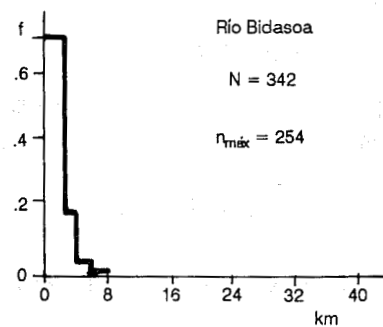
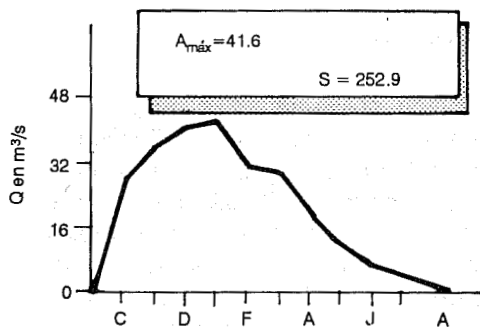
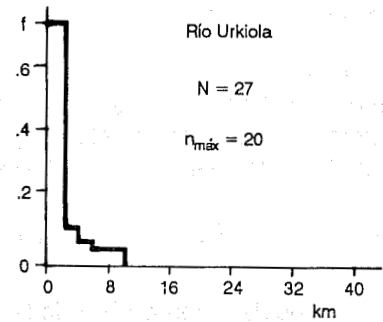
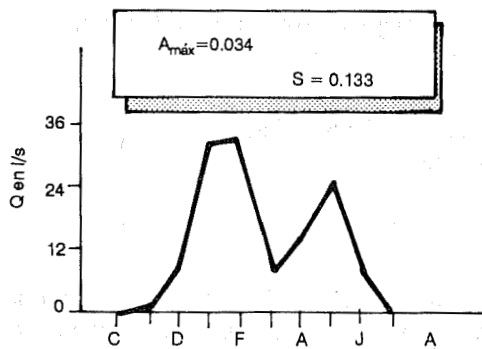
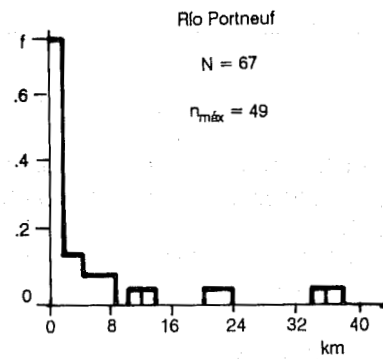
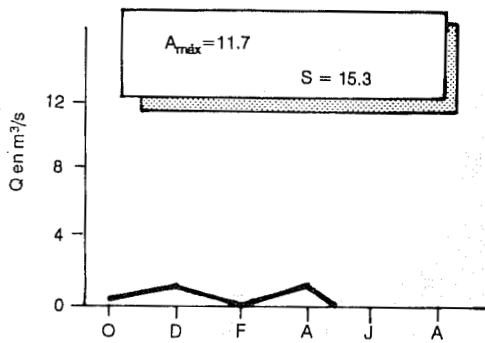
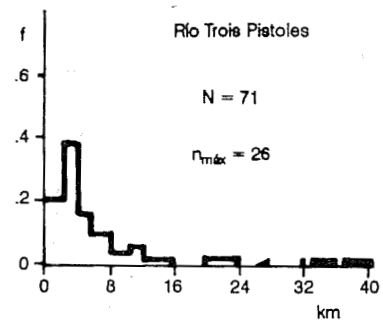
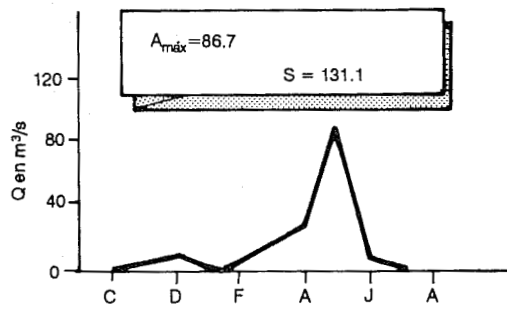
$$C_H = \ln [86.7/(0.131)^2] = 8.52$$

Los valores de C_{fr} y C_H , para las ocho cuencas en Quebec y siete en el País Vasco, aparecen en el cuadro 1. En la ilustración 4 aparecen algunos hidrogramas e histogramas de estaciones características de Quebec y del País Vasco.

Análisis estadístico

Hemos definido dos parámetros, C_{fr} , C_H , que reflejan algunas características de la frecuencia de las longitudes de los cauces y de los hidrogramas residuales medios anuales. Considerando las cuencas del cuadro 1, se han realizado dos estudios de regresión lineal, primero con las muestras hidrológicas obtenidas de un año hidrológico medio (1974-1975) y después con las medias de un conjunto de 10 años.

4. Hidrogramas e histogramas típicos de algunos ríos de Quebec y del País Vasco



En ambos casos los análisis de regresión fueron realizados con todas las estaciones disponibles y luego tratando separadamente las de Quebec y las del País Vasco. Los resultados, en las ilustraciones 5 y 6, muestran las rectas de regresión de C_{fr} versus C_H . Aquí, la ecuación de la recta de regresión es:

$$y = a + bx \quad (5)$$

siendo:

$$b = S_{xy}/S_{xx}, \quad (6)$$

$$S_{xy} = \Sigma xy - \left(\Sigma x \right) \left(\Sigma y \right) / n \quad (7)$$

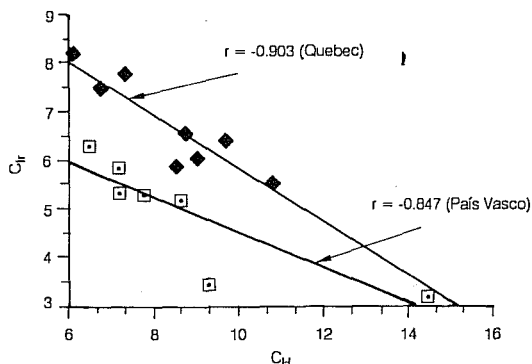
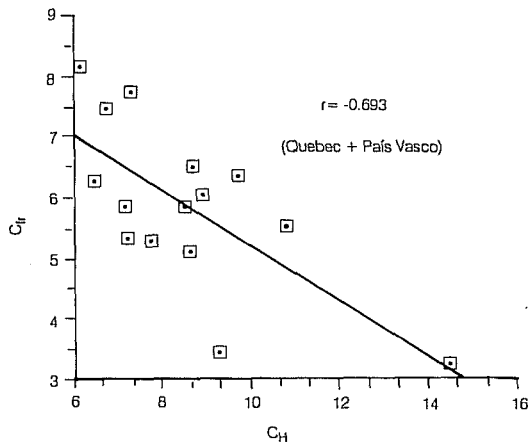
$$S_{xx} = \Sigma x^2 - \left(\Sigma x \right)^2 / n \quad (8)$$

$$a = \bar{y} - b\bar{x} \quad (9)$$

siendo el coeficiente de correlación:

$$r = \frac{S_{xy}}{\sqrt{S_{xx}S_{yy}}} \quad (10)$$

5. Regresión entre el histograma (C_{fr}) de longitudes de cauces y el hidrograma residual (C_H) de un año medio (1974-1975)



$$y = C_{fr} \quad x = C_H$$

n = número de cuencas

Las ecuaciones de regresión son:

- Para un año medio (1974-1975) (véase ilustración 5):

Total	$C_{fr} = 9.718 - 0.448C_H$	$r = -0.693$
País Vasco	$C_{fr} = 8.084 - 0.358C_H$	$r = -0.847$
Quebec	$C_{fr} = 11.308 - 0.548C_H$	$r = -0.903$

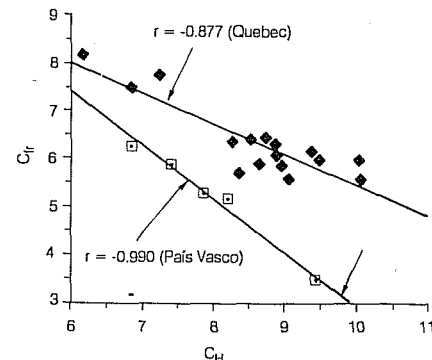
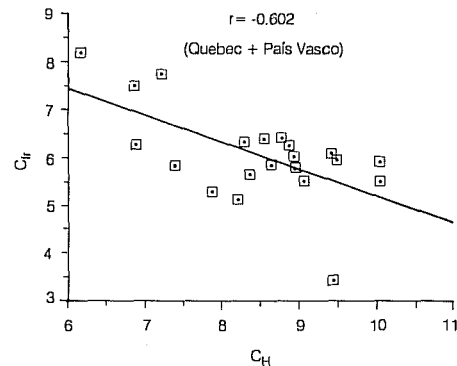
- Para una media de 10 años (véase ilustración 6):

Total	$C_{fr} = 10.722 - 0.552C_H$	$r = -0.602$
País Vasco	$C_{fr} = 14.052 - 0.113C_H$	$r = -0.990$
Quebec	$C_{fr} = 11.863 - 0.643C_H$	$r = -0.877$

Discusión de resultados y conclusión

El valor medio de los coeficientes de correlación obtenidos es bastante alto, lo cual indica la evidencia de una dependencia estadística estable entre las características físicas e hidrográficas de una cuenca.

6. Regresión entre el histograma de longitudes de cauces (C_{fr}) y el hidrograma residual medio anual de un periodo de 10 años (C_H)



Puede observarse, sin embargo, que en los casos en que se acumulan los efectos de las dos regiones (Quebec y País Vasco) la dependencia es sensiblemente menor: 0.693 para un año medio y 0.602 para un conjunto de 10 años. Tomadas separadamente, las dependencias regionales oscilan entre 0.847 y 0.990. El signo negativo de los coeficientes, en las ilustraciones 5 y 6, significa únicamente que el coeficiente angular de las rectas de regresión es menor que cero. Hay que señalar que dichos coeficientes aumentan algo considerando una regresión de tipo exponencial o parabólico.

Estos resultados ponen en evidencia los hechos siguientes:

- Existe una relación estable y significativa entre las características físicas de una cuenca, concentradas en el parámetro C_{fr} (ecuación 3) y el hidrograma medio anual, representado por el parámetro C_H (ecuación 4).
- Esta relación es mayor cuanto más uniforme sea la región cubierta por el estudio. La superficie de una cuenca dentro de una región uniforme no parece afectar el orden de magnitud de la dependencia estadística.
- Aunque en el conjunto de dos regiones hidrologicamente distintas, la dependencia entre los parámetros sea significativa, la varianza explicada

por la regresión es más pequeña que cuando se trata de regiones homogéneas, posiblemente a causa de las diferencias entre el efecto laminador de las cuencas en cada una de las regiones. Este punto deberá investigarse en etapas posteriores de este estudio.

¹ Este trabajo ha sido hecho posible gracias al apoyo de los siguientes Organismos: Conseil de Recherches en Sciences Naturelles et Génie de Canadá (subvención A8540), la Dirección General de Investigación, Científica y Técnica del Ministerio de Educación y ciencia, España (subvención de período Sabático 1989), las autoridades de la Universidad del País Vasco: Proyecto de Investigación 12310-9/88 relativo a la "Investigación hidrológica de cuencas". A todos ellos los autores quieren expresar su más vivo reconocimiento.

Referencias

- Chakravarti, L. M., Laha, R. G. y ROY, J., *Handbook of Methods of Applied Statistics*, John Wiley & Sons, Inc., 1967.
- Llamas, J., *Hydrologie générale: principes et applications*, Gaetan Morin Ed., 1985.
- Llamas, J. *Principes et applications de l'Hydrologie paramétrique*. Reporte GCE-78-01, Université Laval, Quebec, Canadá, 1978.
- Ministère Des Richesses Naturelles du Quebec, *Annuaire hydrologique AH-8 A AH-19*, Service de l'hydrométrie.
- Rogers, W. T., "New Concept in Hydrograph Analysis", *Water Resources Research*, 8(4), pp. 973-981, 1972.