

APLICACIÓN DE MODELOS HIDROLÓGICOS EN ZONAS CON ESCASA INFORMACIÓN

C. ROJAS SERNA; PROFESOR DE ASIGNATURA DE LA FES-ACATLÁN; crojaserna@hotmail.com

PRESENTACIÓN

La repartición natural del agua, considerando la escala del globo terrestre, es muy heterogénea y a menudo, esta repartición natural del recurso es muy diferente a la repartición de los asentamientos de las poblaciones. A través del tiempo, el agua es cada vez una cuestión política y es fuente de crecientes tensiones entre regiones y países. La variabilidad de su disponibilidad es también el origen de problemas para su distribución; existiendo casos de desertificación y en otro extremo, situaciones de abundancia del líquido causando inundaciones catastróficas que recuerdan al hombre la imposibilidad de controlar sus fuerzas. Ante estas circunstancias se tiene paralelamente; el crecimiento de la demanda de agua, relacionada con la multiplicación de usos, tales como el doméstico, el industrial y el agrícola; así como el desarrollo de los problemas de medio ambiente debidos a la contaminación del recurso y que son de origen humano.

En este contexto se comprende la necesidad de establecer herramientas de apoyo a la gestión y a la toma de decisiones que permitan mejorar el entendimiento del funcionamiento de los sistemas hídricos naturales y el futuro del agua en el medio ambiente. Estas herramientas pueden mejorar el conocimiento de la repartición espacial y temporal de los flujos de agua a la escala de una cuenca.

La cuenca es la entidad hidrológica de producción y de concentración de los escurrimientos, por lo tanto es la unidad para estudiar la generación de los flujos de agua en la naturaleza. Un medio para entender la generación de los escurrimientos -y para establecer las simulaciones de los mismos- es remontar hasta su primer origen: las lluvias.

Existen modelos hidrológicos que permiten obtener una representación de la relación entre la lluvia y los escurrimientos. Sin embargo, estos modelos se enfrentan a la complejidad intrínseca de los sistemas cuencas en estudio, tales como a la heterogeneidad de sus características espaciales y a los numerosos factores que tienen influencia en su dinámica temporal.

Este trabajo se inscribe en el dominio de la modelación de la transformación de la lluvia en escurrimiento y de su representación a la escala de la cuenca. En este trabajo se mencionan algunos métodos de modelación que existen actualmente para representar la cuenca como entidad hidrológica y simular sus escurrimientos.

El objetivo principal es aplicar un modelo de simulación de escurrimiento –también llamado *gasto* de la cuenca- y utilizar una metodología que permita validar y aceptar los resultados de las simulaciones de gasto; incluso en las cuencas en las que la información es escasa para efectuar una modelación.

ANÁLISIS

El proceso seguido para la aplicación de un modelo hidrológico lluvia-escurrimiento o lluvia-gasto sigue tres etapas fundamentales: la primera etapa consiste en definir las

cuencas que se estudian, la segunda etapa se refiere al modelo lluvia-gasto que se utiliza para realizar las simulaciones y la tercera etapa consiste en definir el criterio de evaluación de los resultados.

Cuencas en estudio

La muestra de cuencas en análisis está formada por datos de 305 cuencas repartidas en el territorio francés.

Francia tiene un relieve variado y abarca 549,000 km², su altitud media es de 342 m; variando entre planicies, colinas y pequeñas montañas. Se distinguen tres grandes tipos de relieve: los macizos ancianos, las cadenas jóvenes y las cuencas sedimentarias que son atravesadas por grandes cursos de agua. Sin embargo, su hidrografía se caracteriza por no contar con grandes cursos de agua. La superficie de sus cuencas hidrográficas es relativamente reducida, incluso el río Loira, el más largo de los ríos franceses con 1,020 km y una cuenca de 115,000 km², juzgado como modesto entre otros ríos europeos; siendo que su cuenca representa más de la quinta parte del territorio francés. Los gastos tampoco son considerables; el río Ródano que es el de gasto mayor, escurre en promedio 2,000 m³/s en la cabeza de su delta.

El clima está afectado por las perturbaciones del frente polar, provocando gran inestabilidad de un día a otro, así como cierta variabilidad de un año a otro; se pueden distinguir cuatro tipos de clima: oceánico típico, oceánico de transición (o semi-continental), de montaña y mediterráneo. Se producen raramente fenómenos climáticos excesivos; como el frente de invierno del 62-63 y la sequía de verano del 76. La temperatura media está comprendida entre los 10 y 15°C.

Los regímenes son muy variados pero la mayor parte de los cursos de agua tienen un régimen pluvial oceánico en función del clima, sin embargo, ríos como el Loira y el Garona tienen un régimen pluvio-nival.

Las series de datos consideradas han sido utilizadas en diversos estudios y en pruebas a modelos hidrológicos realizados en el *Cemagref* (Centro de Investigación Francés especializado en Hidrología). Esta muestra ha sido generada paulatinamente por Edijatno, (1991), Makhlof, (1994), Nascimento, (1995), Edijatno et al., (1999) y Perrin, (2000) en sus trabajos sucesivos sobre el modelo lluvia-escorrentía GR (*Génie Rural*). Otras cuencas adjuntadas a la muestra, son resultado de los trabajos de Baudez, (1997) y Loumagne et al., (1999), así como las cuencas del Macizo Central Francés, constituidas por Andréassian, (2002) en su tesis sobre el impacto de la evolución de la cobertura forestal en la hidrología de la cuenca.

Las bases de datos hidrométricos y pluviométricos provienen de los bancos de datos HYDRO del Ministerio del Medio Ambiente Francés y PLUVIO de Météo-France, respectivamente.

La base de datos de pluviometría está formada por grandes unidades hidro-geográficas, que dividen el territorio francés en seis zonas que corresponden a las seis Agencias de Cuenca existentes en el país, de las cuales los datos comprenden: 31 estaciones en la cuenca *Rhin-Meuse*, 3 estaciones en la cuenca *Artois-Picardie*, 56 estaciones en la cuenca *Seine-Normandie*, 65 estaciones en la cuenca *Loire-Bretagne*, 61 estaciones en la cuenca *Adour-Garonne* y 91 estaciones en la cuenca *Rhône-Méditerranée-Corse*. Las estaciones hidrométricas consideradas se muestran en la Figura 1.

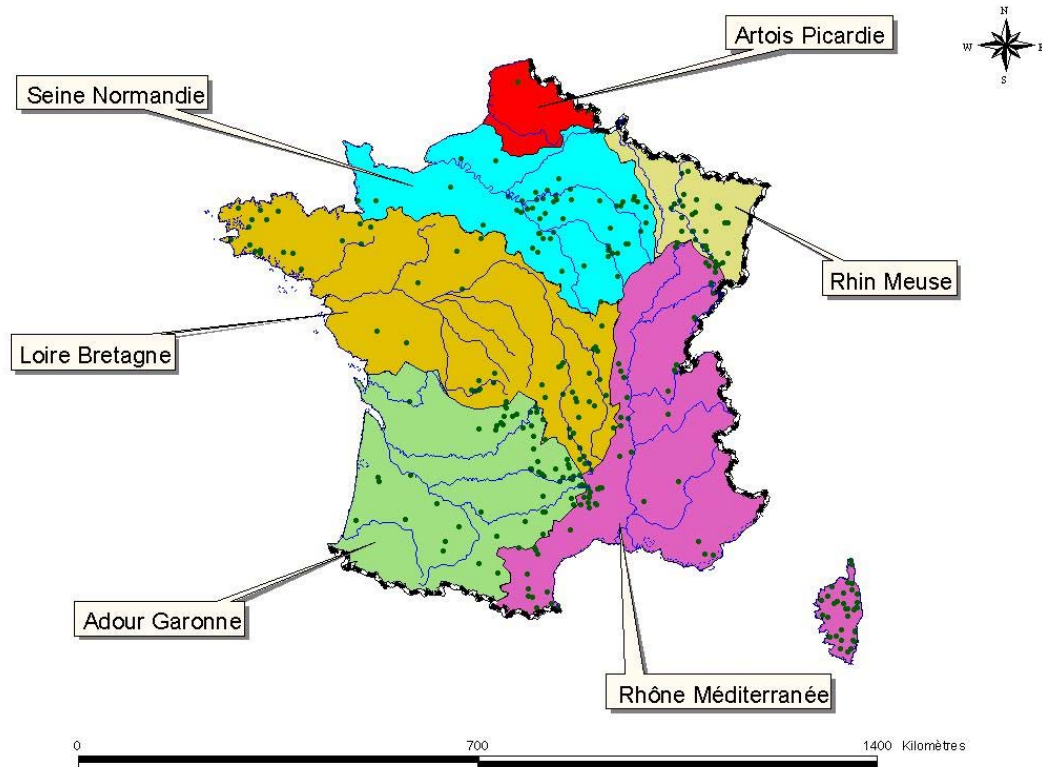


Figura 1 Localización de 305 estaciones hidrométricas francesas (Perrin, 2000)

Los datos de pluviometría están formados por 740 pluviómetros, seleccionados en función de su localización de acuerdo a las cuencas estudiadas. Algunos son utilizados para varias subcuencas o cuencas adyacentes. En el caso de la presencia de varios pluviómetros en una cuenca, la lluvia es calculada como la media de las alturas de lluvia en cada pluviómetro (media aritmética simple) y en el caso de la existencia de lagunas en cierto día de los registros pluviométricos, la estación no es considerada ese día.

En cuanto a las precipitaciones con nieve, se usa un módulo de nieve propuesto por Makhlof, (1994) donde se considera la temperatura. Los datos de evapotranspiración potencial provienen también de Météo-France, mismos que son calculados con la fórmula de Penman, (1948). Debido a los pequeños cambios de ésta variable, las series de evapotranspiración son reconstituidas por los valores medios interanuales a escala de tiempo de diez años, reconstitución que no afecta las entradas de lluvia del modelo (Paturel et al., 1995; Andréassian, 2002). Para asegurar las variaciones continuas de la evapotranspiración y evitar cambios bruscos en los valores, al pasar de una década a la siguiente, se utiliza una fórmula polinomial (Edijatno, 1991). Se disponen de 65 estaciones meteorológicas; para cada cuenca se usan una o más estaciones, en función de su tamaño y en el caso de encontrar más de una estación para una cuenca, se usa un promedio (eventualmente ponderado).

Modelo lluvia-escurrimiento

El modelo diario de lluvia-gasto GR4J (*Génie Rural à 4 paramètres Journalier*) fue desarrollado en el Cemagref-Antony, Francia (Edijatno et al., 1999; Perrin, 2002), y es un modelo de cuatro parámetros para simular los gastos diarios en una cuenca. En sus dominios de aplicación se encuentra la modelización lluvia-gasto con pocos parámetros con vistas a su utilización en cuencas no aforadas.

El modelo GR4J es un modelo empírico ya que descompone la transformación de la lluvia en gasto en subprocesos que son tratados de manera global. Estos subprocesos toman la forma de reservas o captaciones que se llenan y se vacían en el curso del tiempo, permitiendo al sistema tener una memoria de las condiciones anteriores. El modelo es esquemáticamente constituido por captaciones interconectadas que aseguran la transformación de la lluvia en gasto, siguiendo la representación del sistema hidrológico modelizado.

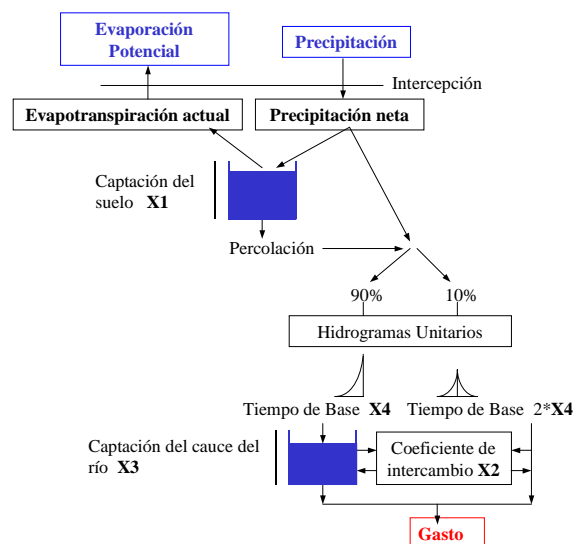


Figura 2 Estructura del modelo diario de lluvia-escorrentía GR4J, (Perrin, 2000)

En la Figura 2 se muestra la estructura del modelo GR4J donde la representación del ciclo hidrológico parte de la precipitación; a partir de la cual se crea una precipitación neta al perder parte de la precipitación bruta por evapotranspiración. Una parte de la precipitación neta alimenta la reserva del suelo (captación del suelo) y el resto transita hacia el punto de salida de la cuenca. Cuando la precipitación bruta es interceptada en su totalidad por el medio ambiente, el agua contenida en el suelo empieza a evaporarse. La cantidad de agua que escurre hacia la salida de la cuenca es retardada en función de la respuesta de la cuenca a la lluvia (tiempo de base del hidrograma unitario) y es separada en dos componentes de escurrimiento: el escurrimiento semi-directo y el escurrimiento directo. El tiempo de base del hidrograma unitario permite simular el tiempo que transcurre entre el inicio de la lluvia y el establecimiento del escurrimiento directo. El escurrimiento directo representa el 90% de la lluvia eficaz y es retardado por el hidrograma unitario que simula el tiempo de pico (tiempo en que se produce el gasto máximo de la tormenta), circulando así por la captación del cauce del río hasta llegar a la salida de la cuenca. El 10% restante de la lluvia eficaz corresponde al escurrimiento semi-directo y el tiempo de base del hidrograma unitario es dos veces el tiempo de pico del escurrimiento directo, llegando directamente a la salida de la cuenca. El gasto en el punto de salida de la cuenca está alimentado por la infiltración. La

infiltración superficial o profunda está definida por los intercambios de agua superficiales o subterráneos (coeficiente de intercambio).

Criterio de evaluación y validación de resultados

El funcionamiento de los modelos lluvia-escorrente operacionales se caracteriza por la utilización de parámetros que permiten representar el comportamiento hidrológico de las cuencas, calculando los gastos a partir de la lluvia. Generalmente, los parámetros de los modelos deben ser optimizados con datos de gasto medidos en una estación de aforo. Sin embargo, en el caso de las cuencas no aforadas, en las que las series de datos no son disponibles para hacer una primera evaluación de los parámetros, la pregunta es: ¿Es posible tomar en cuenta alguna otra información (regional o puntual), para estimar los parámetros de los modelos? Buscando aplicar útilmente los modelos disponibles lluvia-escorrente ante ésta situación, se analiza una metodología que permite derivar, a partir de una información hidrométrica puntual y local (ciertas medidas de gasto), los parámetros que caracterizan el funcionamiento de los ríos. Dicha metodología es aplicable en cuencas aforadas, parcialmente aforadas, o bien en el caso de cuencas no aforadas donde se puede recurrir a tomar ciertas medidas puntuales de gasto en el punto hidrográfico de interés.

La metodología consiste en explorar una vía intermediaria entre la información conocida de la cuenca y sus escorrentes. En dicha vía se explota a la vez una información regional y una información puntual de los gastos (por ejemplo, la existencia de algunos aforos o de series de gasto de muy corta longitud). El objetivo principal es explorar una información parcial de gastos en una cuenca, con el fin de obtener -de manera preliminar- algún conocimiento de la influencia del número de gastos aforados para la determinación de los parámetros.

Para hacer corresponder -en lo posible-, las series de gasto calculadas por un modelo lluvia-escorrente con las series de gasto observadas o aforadas, se adopta un procedimiento de optimización que consiste en minimizar las variaciones entre los gastos medidos y los gastos calculados. En este procedimiento se adaptan los valores de los parámetros del modelo de manera iterativa.

Para medir el grado de adecuación medio entre los valores simulados y aforados, se adopta el procedimiento "*split-sample test*" (Klemeš, 1986): para cada cuenca se separan las series de datos disponibles en dos subperiodos independientes, se evalúan los parámetros con los datos del primer subperiodo y después se validan con la simulación en el segundo subperiodo. El procedimiento descrito anteriormente es repetido intercambiando los roles de los subperiodos (evaluación de los parámetros con el segundo subperiodo y validación con el primero).

La optimización de los parámetros en cada subperiodo se realiza con el criterio clásico de mínimos cuadrados

Las simulaciones se validan con el criterio clásico de Nash (Nash and Sutcliffe, 1970):

$$Nash = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{obs_i} - Q_{calc_i})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{obs_i} - \overline{Q_{obs}})^2}$$

Cuando el criterio de Nash es igual a 1, no existe error en la simulación del modelo. En las ecuaciones 5 y 6 Q_{obs} indica el gasto observado y Q_{calc} el gasto calculado.

Perrin (Perrin, 2000) concluyó que para valores de Nash iguales o superiores a 0.5 las simulaciones de gasto son "aceptables" (pruebas realizadas para 38 modelos lluvia-escorrentía en una muestra de 429 cuencas). Este valor de Nash igual a 50% es considerado como el umbral de aceptabilidad para evaluar la capacidad de la estructura del modelo para simular la transformación lluvia-gasto en una cuenca en condiciones reales.

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

En este trabajo se analizó la influencia del número de gastos conocidos en la determinación de los parámetros de un modelo lluvia-gasto. Para la validación de la metodología de calibración de un modelo a diferentes cuencas se utilizó el modelo de lluvia-gasto GR4J, sin embargo esta metodología puede ser aplicada en la utilización de cualquier otro modelo hidrológico. Un gran número de cuencas aforadas se trataron como si no se conocieran sus series de gasto.

La continuación de esta trabajo ha consistido en aplicar y validar la metodología aplicada en una muestra de cuencas mexicanas y de otros países; explotando así una información hidrométrica puntual en numerosas cuencas con condiciones climáticas diferentes; esto con el interés de tener un método generalizable.

BIBLIOGRAFÍA (12 PUNTOS)

1. Andréassian, V., 2002. "Impact de l'évolution du couvert forestier sur le comportement hydrologique des bassins versants". Thèse de Doctorat Thesis, Université Pierre et Marie Curie Paris VI, Cemagref (Antony), 276 pp.
2. Baudez, J.C., 1997. "Déterminants hydrologiques régionaux pour la gestion et la prévision des ressources en eau". Mémoire d'ingénieur Thesis, ENGEES/Cemagref, 88 pp.
3. Edijatno, 1991. "Mise au point d'un modèle élémentaire pluie-débit au pas de temps journalier". Thèse de Doctorat Thesis, Université Louis Pasteur/ENGEES, Strasbourg, 242 pp.
4. Edijatno, Nascimento, N.O., Yang, X., Makhlouf, Z. and Michel, C., 1999. "GR3J: a daily watershed model with three free parameters". Hydrological Sciences Journal, 44(2): 263-277.
5. Klemeš, V., 1986. "Operational testing of hydrological simulation models". Hydrological Sciences Journal, 31(1): 13-24.
6. Loumagne, C., Michel, C., Palagos, B., Baudez, J.C. and Bartoli, F., 1999. "D'une approche globale vers une approche semi-distribuée en modélisation pluie-débit (From a global to a semi-distributed approach in rainfall-runoff modelling)". La Houille Blanche(6): 81-88.
7. Makhlouf, Z., 1994. "Compléments sur le modèle pluie-débit GR4J et essai d'estimation de ses paramètres". Thèse de Doctorat Thesis, Université Paris XI Orsay, 426 pp.
8. Nascimento, N.O., 1995. "Appréciation à l'aide d'un modèle empirique des effets d'action anthropiques sur la relation pluie-débit à l'échelle du bassin versant". Thèse de Doctorat Thesis, CERGRENE/ENPC, Paris, 550 pp.
9. Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V., 1970. "River flow forecasting through conceptual models. Part I - A discussion of principles". Journal of Hydrology, 27(3): 282-290.
10. Paturol, J.E., Servat, E. and Vassiliadis, A., 1995. "Sensitivity of conceptual rainfall-runoff algorithms to errors in input data - case of the GR2M model". Journal of Hydrology, 168: 11-125.
11. Penman, H.L., 1948. "Natural evaporation from open water, bare soil and grass". Proc. R. Soc. London, A193: 120-145.

- 12.** Perrin, C., 2000. "Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative". Thèse de Doctorat Thesis, INPG (Grenoble) / Cemagref (Antony), 530 pp.
- 13.** Perrin, C., 2002. "Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative". La Houille Blanche(6/7): 84-91.