

Simulación hidrológica

Las tendencias del modelamiento en hidrología dependen del problema a tratar. En general, se describe cualquier subsistema del ciclo hidrológico como un sistema y se representa en forma de modelo estocástico o determinístico; en ambos casos se puede realizar simulación en computador dependiendo del modelo propuesto.

Con relación al modelamiento estocástico se hace énfasis en la búsqueda actual de modelos robustos para el análisis de caudales anuales máximos.

CARLOS A. GONZALEZ M.
Ing. Agrícola, M. Sc. en hidrología
Profesor asistente
Departamento de Ingeniería Agrícola

General

A través de la historia, la prosperidad de las naciones ha estado estrechamente ligada al manejo del agua, ya sea para uso directo (consumo humano y/o animal), uso indirecto en sistemas de riego, o como generador de energía.

Los problemas asociados a la demanda y disponibilidad de agua han generado cada día mayor investigación en diferentes campos de la ciencia, entre éstos la Hidrología.

En un sentido amplio, la hidrología es la ciencia del comportamiento del agua bajo condiciones naturales..., vinculada con toda el agua sobre la tierra; su comportamiento, su distribución y circulación; sus propiedades físicas y químicas y sus efectos sobre el medio ambiente y la vida en todas sus formas (Raudkivi, 1979).

Específicamente la hidrología se relaciona con el movimiento del agua desde la precipitación hasta su regreso al mar a través de los ríos, o a la atmósfera por el proceso de evaporación. Trata también con el movimiento del agua sobre la superficie de la tierra, en forma laminar o en canales; la infiltración y la retención en el suelo; su movimiento dentro de éste en la zona saturada o saturada y la relación agua-suelo-planta-atmósfera (Nash, 1984).

El ciclo hidrológico puede ser representado de diferentes formas; una de éstas es como un sistema (ver figura 1) que permite un estudio integral del fenómeno. Sin embargo, a pesar de que esto es ideal, dada la complejidad del ciclo, todavía no existe un análisis global del mismo.

La hidrología se relaciona generalmente con uno o varios subsistemas del ciclo hidrológico, siendo el más notorio el proceso lluvia-escorrentía.

De acuerdo con Dooge J. (1973), un sobresaliente hidrólogo, un sistema es cualquier estructura, aparato, esquema o procedimiento, real o abstracto, que interrelaciona en un determinado tiempo de referencia, una entrada, causa o estímulo de materia, energía o información y una

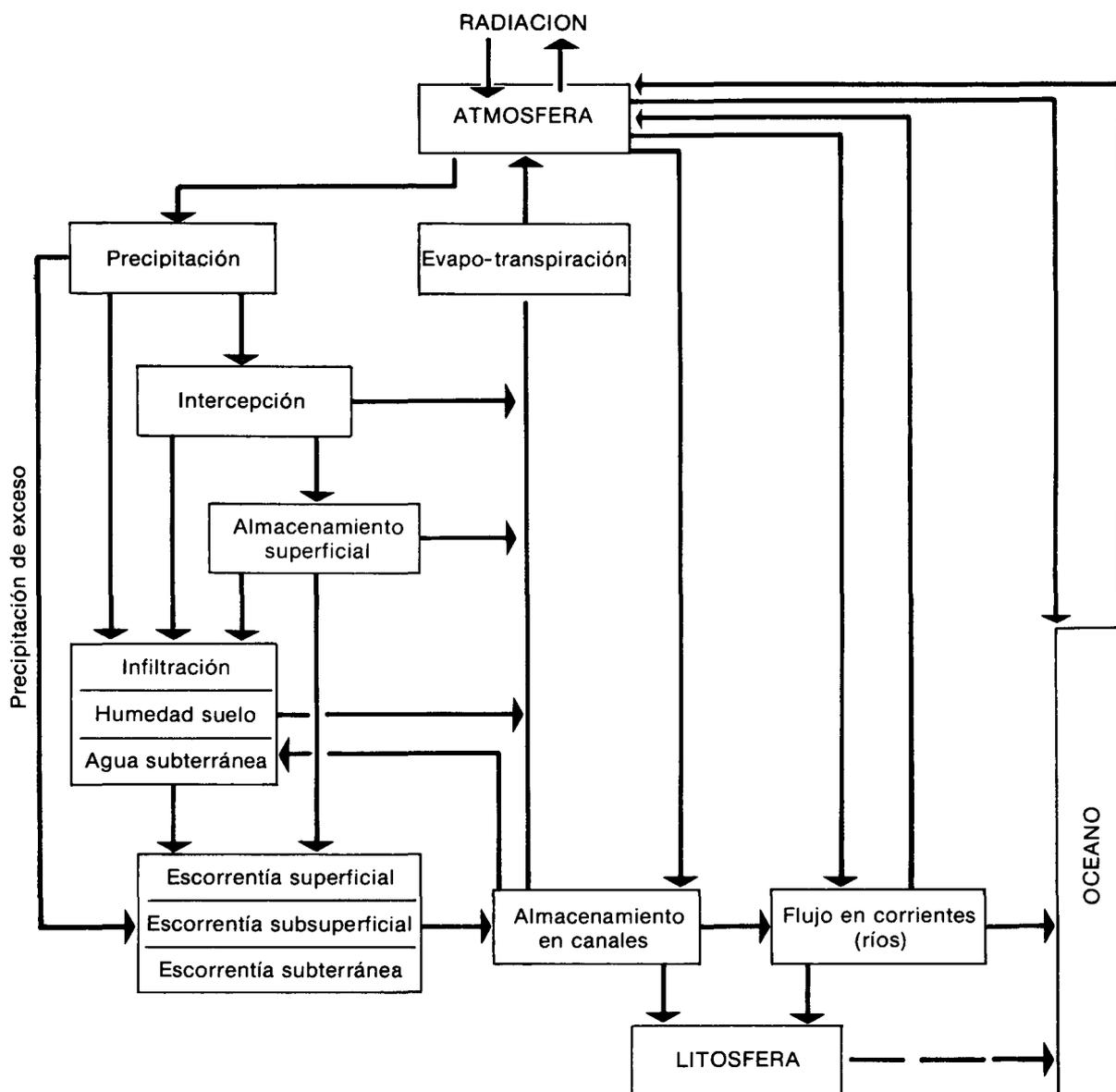


FIGURA 1. Representación del ciclo hidrológico como un sistema. (Tomado de Raudkivi, 1979)

salida, efecto o respuesta de información, energía o materia.

Cuando se trata de analizar en hidrología el sistema de la cuenca hidrográfica —subsistema del ciclo hidrológico— (ver figura 2), el problema que se presenta es tratar de predecir la salida de éste (escorrentía). Las figuras 3A y 3B muestran los elementos que conjuntamente la determinan. Las complejidades surgidas de las leyes físicas y la estructura del sistema estudiado son combinadas en el concepto de operación del sistema.

Para hacer una representación del sistema que permita simular su comportamiento, el hidrólogo se vale de modelos específicos, los cuales, dada su concepción, van a ser clasificados como determinísticos o estocásticos.

MODELOS DETERMINISTICOS

Para describir un sistema hay que partir de ciertas suposiciones acerca de la naturaleza del mismo y las leyes físicas que gobiernan su comportamiento que, conjuntamente con la entrada (precipitación, contenido de humedad, etc.), tratan de combinarse para producir la salida de éste (escorrentía, variación del contenido de humedad, nivel freático, etc.).

Cuando esta relación entre entrada y salida del sistema se trata de explicar en forma **causal**, es decir que en el proceso existe una entrada que determina la salida del sistema como función del tiempo, se dice que el sistema es determinístico. En el estudio del modelamiento de la cuenca hidrográfica como un sistema, los modelos

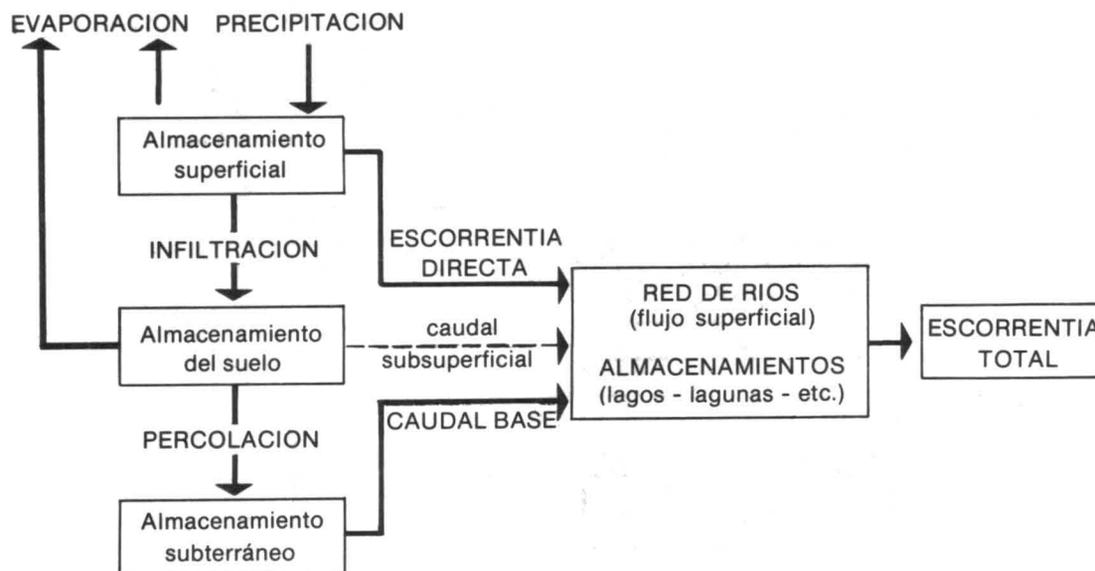


FIGURA 2. El sistema de la cuenca hidrográfica (Tomado de O'Donnell 1984).

determinísticos han sido estudiados en dos formas generales (ver figura 4), suponiendo que el sistema es lineal o no lineal. Un sistema lineal es caracterizado por las propiedades de proporcionalidad y superposición. Este sistema, a su vez, puede ser variable o no variable con el tiempo.

El hidrograma unitario (H.U) (Sherman, 1932), una de las herramientas o modelos más útiles para describir el proceso lluvia-escorrentía a partir de la lluvia de exceso (entrada) que convoluciona a través de la cuenca hidrográfica para producir la escorrentía (salida), es un modelo lineal donde las propiedades de proporcionalidad y superposición se conservan, así como la invariabilidad con el tiempo, es decir, la respuesta de la cuenca (escorrentía) es la misma, independiente del momento en que se produzca la precipitación.

El concepto de H.U sería más útil en hidrología aplicada si la precipitación de excesos (la que

produce la escorrentía) y la escorrentía fueran adecuadamente definidas e identificables. La dificultad no estriba mucho en lo apropiado de la suposición sino en la dificultad de definir e identificar las cantidades que son supuestamente relacionadas por el hidrograma unitario (Nash, 1984).

Este modelo se relaciona con la entrada (lluvia de exceso) $X(t)$, que convoluciona a través del H.U. $h(t)$ para producir una salida $y(t)$ (escorrentía). Estas tres entidades están directa y explícitamente relacionadas, pero no especifican en ningún momento la forma detallada del trabajo del sistema. En este caso ningún comportamiento físico de la cuenca es involucrado. Este procedimiento es conocido como **método de análisis**, en muchos casos nombrado como de **caja negra** (black box approach).

Los **métodos de síntesis**, por otro lado, intentan simular el trabajo interno del sistema, usando

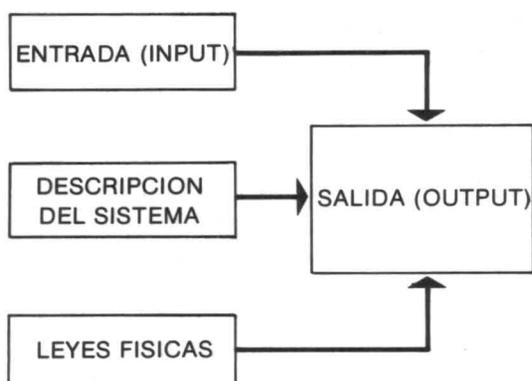


FIGURA 3A. Factores que afectan la salida en un sistema.

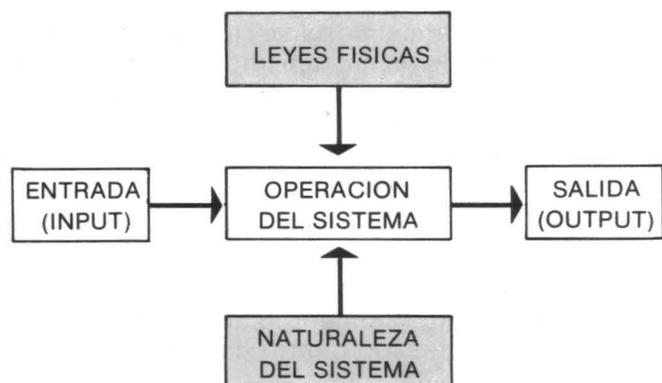


FIGURA 3B. El concepto de operación de un sistema. (Tomado de Dooge J., 1973).

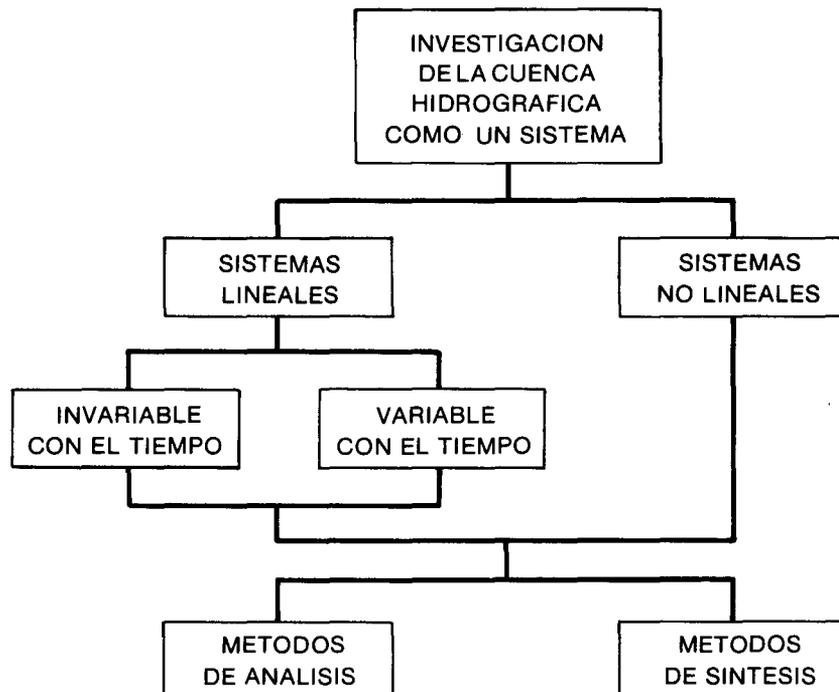


FIGURA 4. Métodos de investigación de la cuenca hidrográfica como un sistema. (Tomado de O'Donnell, 1984).

elementos estructurados, relaciones matemáticas que describen el proceso físico detallado y sus interconexiones de trabajo dentro de la cuenca hidrográfica (O'Donnell, 1984). Son conocidos como aproximación de caja de Pandora (Pandora box approach).

Tanto los métodos de conceptualización lineales como no lineales, realizan aproximaciones de análisis y síntesis (figura 4). Sin embargo, como señala O'Donnell (1984), la aproximación no lineal de análisis (caja negra), tiene todavía poca aplicación debido, básicamente, a las dificultades matemáticas que se enfrentan. Es por ello que el modelamiento acerca del comportamiento del sistema en forma no lineal generalmente ha seguido el proceso de síntesis. La forma general de éste procedimiento se puede observar en la figura 5.

En el proceso de síntesis se requiere primero la construcción de un mecanismo de simulación de la cuenca y luego ajustarlo de tal forma que proporcione una buena aproximación a los registros de entrada y salida que en un momento determinado se posean.

Vargas F. et al (1988) señalan en forma clara las etapas que tendría éste proceso de síntesis:

1. Colección y análisis de datos reales representativos de un fenómeno (subsistema) del que se está interesado dentro del sistema.
2. Definición del problema que debe ser analizado y obtenido a partir de un modelo de simulación.
3. Formación de un modelo conceptual. Es en esta parte donde el investigador se debe proyectar sobre el fenómeno principal y las relaciones que éste tenga con otras variables en forma cuantitativa.
4. Formular el modelo matemático basado en las funciones planteadas.
5. Desarrollar algoritmos que sean lógicos etapa por etapa, con el objetivo de solucionar el modelo matemático.
6. Chequeo del algoritmo realizando cálculos hipotéticos.
7. La programación del modelo usando un apropiado lenguaje (Fortran, Basic, Pascal, etc.) que será introducido al computador.
8. Estimación de los parámetros necesarios del sistema, a partir de la disponibilidad de información del sistema real, si fuese necesario realizar experimentos en forma independiente para obtenerlos.
9. Hacer funcionar el programa para estar seguros de que está libre de errores y de que es consistente tanto en forma dimensional como en su lógica interna.
10. Probar la sensibilidad del modelo a la variación de parámetros y factores, particularmente aquellos que son un poco inciertos, muy variables o que están bajo nuestro control en la realidad.
11. Preparar y realizar ensayos pertinentes a la simulación, orientados a la solución de pro-

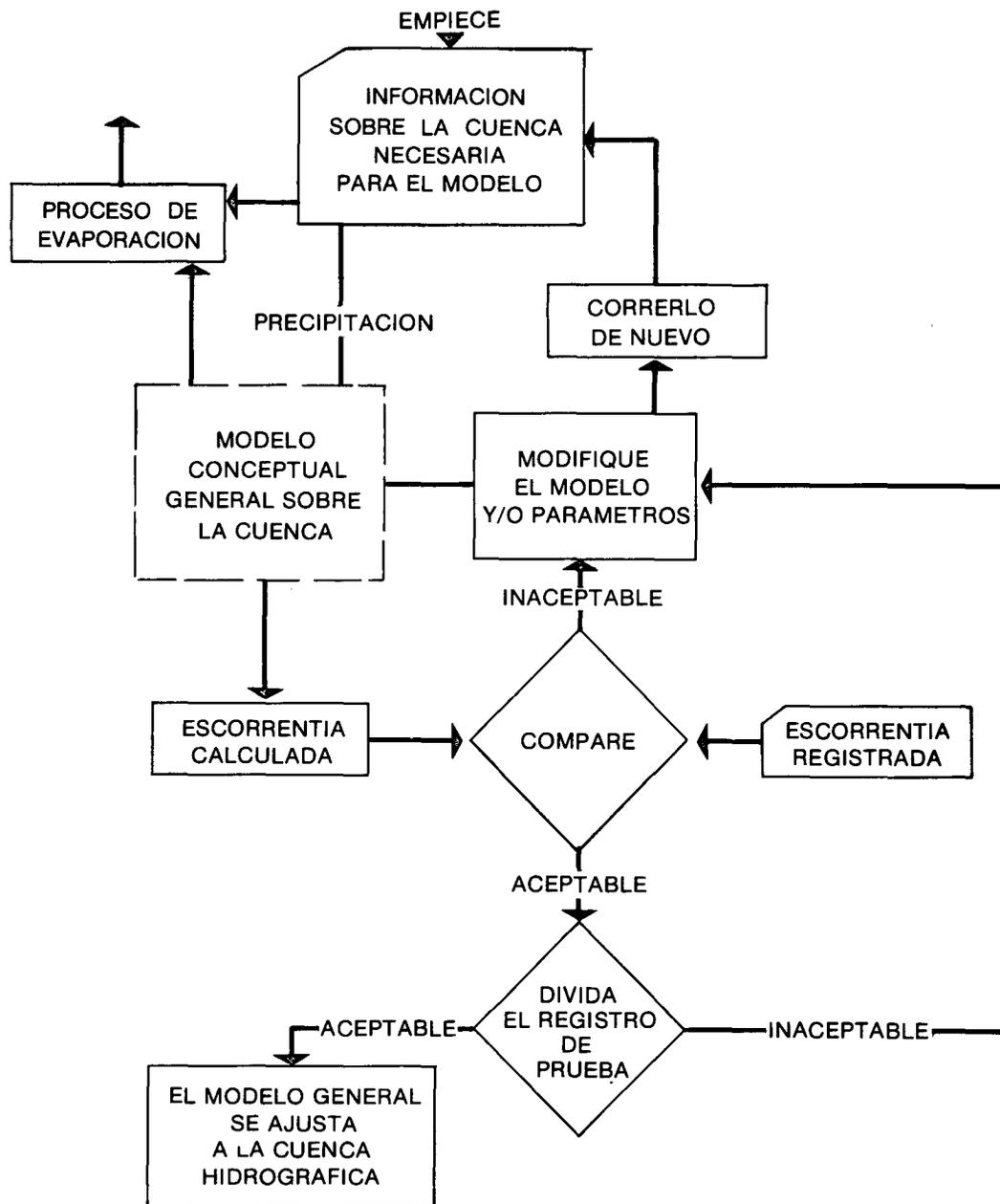


FIGURA 5. Estrategia general de modelamiento de la cuenca hidrográfica. (Tomado de O'Donnell, 1984).

blemas por los que el modelo fue establecido prioritariamente.

12. Análisis de los datos simulados y predichos del sistema real bajo las diferentes premisas en que se definió el problema.
13. La variación o rechazo del modelo con base en las comparaciones de los valores predichos con aquellos obtenidos del sistema real.
14. Modificación o desarrollo posterior del modelo, tanto como se juzgue necesario para corregir los defectos y mejorar su potencial predictivo.

Dentro de estos modelos de síntesis se pueden enumerar, a manera de ejemplo, el modelo

Stanford Watershed Model IV, en relación con el proceso lluvia-escorrentía. Para trabajar en el modelamiento del subsistema del ciclo hidrológico agua-suelo-planta-atmósfera, uno de los más conocidos es el modelo SWATR (Soil Water and Actual Transpiration Rate), realizado por Feddes et al (1978) y sus posteriores modificaciones, Belmans et al (1983), Feyen J. (1986).

MODELOS ESTOCASTICOS

Son aquellos en los cuales se produce una salida que se desarrolla en el tiempo de una manera controlada por las leyes de probabilidad o chance (Cunnane, 1984).

El hidrógrafo de un determinado río, en cualquier

punto de éste puede ser considerado un proceso estocástico cuando se observa en un período prolongado. Sin embargo, si se examina la escorrentía en cualquier instante particular, se podrían determinar sus causas físicas en términos de la lluvia, evaporación y otros mecanismos de la cuenca. Este último proceso sería determinístico. Dentro de los modelos estocásticos de escorrentía, los más conocidos son: modelamiento de caudales anuales máximos, caudales anuales mínimos, series de duración parcial y series de tiempo.

En adelante se prestará mayor atención al modelamiento de las series de caudales anuales máximos y la búsqueda de modelos robustos en este contexto, mediante los métodos de simulación de Montecarlo.

No es raro encontrar en el país daños causados por las crecidas de los ríos. El análisis de frecuencia de crecidas es, por tanto, de suma importancia para nuestro país.

Cuando se desea diseñar una presa, instalar una termoeléctrica, construir un puente, etc., se requiere conocer el caudal máximo que podría producirse en un determinado período de tiempo. En este análisis se supone que la serie de caudales anuales máximos es una muestra aleatoria idéntica e independientemente distribuida, la cual es usada para obtener inferencias acerca de la población de la que proviene.

Generalmente se supone que esta muestra proviene de una determinada distribución (la distribución es un atributo de la población estadística); sin embargo la pregunta que inmediatamente surge es: ¿QUE DISTRIBUCION SE USA? Esta pregunta es muy difícil de responder; si se realiza una inspección somera sobre los modelos que se han introducido para el análisis de crecidas, se encuentran un gran número de éstos, entre los que se pueden mencionar: la distribución Normal, Logarítmica normal, Pearson tipo III, General de valores extremos, etc. El problema se agrava ya que para cada una de las distribuciones existen diferentes métodos de estimación de parámetros; ello conlleva a que por cada distribución que se use con un método de estimación de parámetros determinado, la estimación final diferirá, y generalmente en forma ostensible, especialmente para aquellos períodos de retorno de diseño (100, 200, 1000 años).

Algunos de los problemas que se encuentran en la selección de la distribución a utilizar han sido señalados por González C. (1988).

Ante las dificultades inherentes a la selección de la distribución a utilizar, en los últimos años la investigación se ha dirigido hacia la búsqueda de modelos robustos.

¿QUE ES UN MODELO ROBUSTO?

De acuerdo con Kuczera G. (1982), un modelo robusto es aquel que el analista usa confiablemente como una herramienta predictiva para su trabajo (en este caso, para predecir crecidas). Esta definición de robustez de un modelo es muy superficial para ser útil. Por ello es necesario señalar la robustez de un modelo en una forma operacionalmente útil; una forma natural de hacer esto es caracterizar la robustez en términos de sus propiedades. En el contexto de modelamiento de caudales anuales máximos parece razonable insistir en que un modelo robusto posea al menos las siguientes propiedades:

Resistencia

Un modelo resistente debe ser capaz de estimar eventos extremos, independientemente de cuál sea la distribución que mejor represente la muestra a disposición, sin una pérdida desastrosa de su desempeño. Este desempeño está indicado por algún criterio, tal como el error cuadrático medio. Esto significa que las diferencias en el desempeño de las suposiciones de distribución entre los más favorables y los menos favorables son en algún sentido minimizadas (Kuczera G., 1982).

Slack *et al* (1975), citados por Kuczera G. (1982), en una investigación que buscaba un estimador resistente, en ausencia de información acerca de la distribución que genera la muestra de caudales máximos, encontraron que la distribución normal es preferible a las distribuciones Gumbel, Logarítmica normal de 3 parámetros y a la distribución Weibull.

Eficiencia

La sola propiedad de resistencia es insuficiente en un estimador. Este deberá tener también un bajo error estándar (Kuczera., 1982).

Generalmente la estrategia para la búsqueda de un modelo robusto consiste en encontrar una distribución con parámetros representativos del mundo real para utilizarla como aquella que genera las muestras (Grand Parent), luego buscar estimados resistentes y explotar la información regional con el objetivo de mejorar la eficiencia del modelo en forma puntual.

El proceso de simulación del modelo robusto se puede llevar a cabo a nivel puntual y/o regional.

Test de simulación para analizar la robustez a nivel puntual

1. Seleccionar la distribución madre (generadora de las muestras).
2. Calcular los cuantiles verdaderos.
QT: los caudales con períodos de retorno que

se vayan a evaluar. Por ejemplo:
 Q_{10} , Q_{20} , Q_{50} , Q_{100} , Q_{500} , Q_{1000} años.

Estos cuantiles son los verdaderos.

3. Seleccionar la distribución a probar. Por ejemplo: Gumbel, Normal, Pearson, tipo 3, General de valores, etc.
 4. Seleccionar los métodos de estimación de parámetros. Por ejemplo: Gumbel ajustado por el método de momentos, máxima probabilidad, momentos ponderados de probabilidad (PWM).
 5. Generar una secuencia de N valores provenientes de la distribución madre.
 6. Ajustar las distribuciones con los diferentes métodos de estimación de parámetros.
 7. Para cada método (distribución - forma de ajuste) hallar los cuantiles (\hat{Q}_T) para los mismos períodos de retorno inicialmente seleccionados ($T= 10, 20, 50, 100, 500, 1000$ años).
- Q_T (estimador de caudal para el período de retorno T).
8. Almacenar los valores en matrices, de acuerdo con el número de métodos probados y los períodos de retorno analizados.
 9. Repetir desde el paso 5 al 8 el número de veces M que se desee ($M= 500, 1000, 10000$ veces).
 10. Calcular el promedio para cada método (distribución - forma de ajuste) y período de retorno determinado.

$$\bar{\hat{Q}}_T = \frac{\sum_{i=1}^M \hat{Q}_T}{M}$$

11. Hallar el error estándar (Se) para cada período de retorno.

$$Se(\hat{Q}_T) = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^M (\hat{Q}_T - \bar{\hat{Q}}_T)^2}{M} \right\}^{1/2}$$

12. Hallar el RMSE (error cuadrático medio) y el sesgo.

$$RMSE(\hat{Q}_T) = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^M \left[\frac{\hat{Q}_T - Q_T}{Q_T} \right]^2}{M} \right\}^{1/2}$$

$$Sesgo(\hat{Q}_T) = \frac{\bar{\hat{Q}}_T - Q_T}{Q_T}$$

13. Suponer que Q_T se distribuye normalmente.

$$\hat{Q}_{T \ 0.05} = \frac{\hat{Q}_T - 1.96 Se(\hat{Q}_T)}{Q_T}$$

$$\hat{Q}_{T \ 0.95} = \frac{\hat{Q}_T + 1.96 Se(\hat{Q}_T)}{Q_T}$$

Nota: las divisiones sobre Q_T facilitan la comparación de resultados.

14. Graficar resultados y compararlos. Ejemplo de gráfica de sesgo:

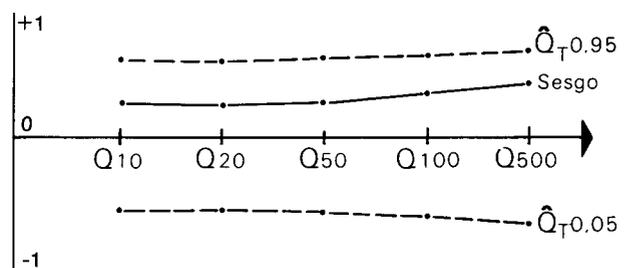


FIGURA 6. Forma como se gráfica el sesgo y su variación en los resultados de simulación.

15. Establecer conclusiones.

Test de simulación para analizar la robustez a nivel regional

1. Seleccionar la región a simular con P estaciones.
2. Seleccionar la distribución madre para la región.
3. Calcular los cuantiles verdaderos en la región.
4. Seleccionar los métodos regionales y/o puntuales a probar.
5. Generar muestras de tamaño N, provenientes de la distribución madre para los P sitios.
6. Ajustar los métodos regionales y/o puntuales seleccionados a las muestras generadas.
7. Hallar los cuantiles puntuales verdaderos y los ajustados por los diferentes métodos seleccionados.
8. Repetir M veces la generación de las muestras de tamaño N para los P sitios.
9. Calcular para cada uno de los P sitios el sesgo, RMSE, Se, y las cantidades $Q_{T0.95}$ $Q_{T0.05}$.
10. Comparar los diferentes resultados.

González C. (1986 y 1989), presenta algunos estudios realizados para evaluar los procedimientos actualmente en uso y señala que existe un método particularmente robusto y útil para nuestro país, siendo éste el presentado por Wallis J. (1980) denominado Método Regional de Momentos Ponderados de Probabilidad.

CONCLUSIONES

Los estudios de simulación, ya sea de modelos determinísticos o estocásticos, han sido particularmente útiles en el desarrollo de la hidrología; sin embargo, este tipo de estudios concebidos en el país son muy escasos dada la tendencia nuestra a realizar solamente ajustes de modelos

preconcebidos en otros lugares; aunque es bien cierto que no hay una necesidad de duplicar esfuerzos, se hace necesaria una mayor "agresividad" intelectual de nosotros los que, de alguna forma, tenemos la posibilidad escasa de desarrollar investigación en el país.

BIBLIOGRAFIA

1. Belmans, C., J. G. Wesseling and R.A. Feddes. Simulation model of the water balance of a cropped soil: SWATRE. *J. Hydrol.* (63), 1983.
2. Cunnane, C. Stochastic hydrology - Lecture notes, postgraduate course in hydrology. University College Galway - IRELAND, 1984.
3. Dooge, J. C. I. Linear theory of hydrological systems - technical bulletin-USDA, 1973.
4. Feddes R.A., P.J. Kowalik and H. Zaradny. Simulation of field water and crop yield. Wageningen, 1978.
5. Feyen, J.. Swatrer model - Software handbook. Faculty of Agricultural Sciences. Leuven Belgium, 1986.
6. González C. Regional flow analyses for the Valle del Cauca región in Colombia. M.Sc thesis University College Galway, IRELAND, 1986.
7. González C. Algunos estudios estadísticos útiles en hidrología - Revista Ingeniería e Investigación No. 17. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 1988.
8. González C. Métodos regionales de análisis de frecuencia. A ser publicado en la Revista Ingeniería e Investigación, 1989.
9. Kuczera, G. Robust flood frequency models. *Water Resources Research*, Vol. 18 (2), 1982.
10. Nash J.E. Applied hydrology part I: Deterministic Lecture notes postgraduate course in hydrology. University College Galway, IRELAND, 1984.
11. O'Donnell, T. Deterministic catchment modelling. In Real time river flow forecasting, edited by J.R. Moll, 1984.
12. Raudkivi, A.J. Hydrology: An advance introduction to hydrological processes and modelling. Pergamon Press, U.K., 1984.
13. Vargas, F., J. Ledieu, y S. Dautrebande. La modelización en física de suelos. Escuela Latinoamericana de física de suelos, Sao Paulo, Brasil, 1988.
14. Wallis, J.R. Risk and uncertainties in the evaluation of flood events for the design of hydrological structures. Keynote Address Seminar on extreme hydrological events: Floods and Droughts. Erice, ITALY, 1980.