

# ANÁLISIS DEL RENDIMIENTO DE SISTEMAS HÍDRICOS EN DESARROLLO MEDIANTE EL ACOPLE DE MODELOS ESTOCÁSTICOS HIDROLÓGICOS Y OPTIMIZACIÓN DE REDES DE FLUJO

## PERFORMANCE ANALYSIS OF DEVELOPING WATER SYSTEMS THROUGH THE COUPLING HYDROLOGIC STOCHASTIC MODELS AND NETWORK FLOW OPTIMIZATION

Alex Avilés-Añazco<sup>1,\*</sup>, Abel Solera-Solera<sup>2</sup>, Javier Paredes-Arquiola<sup>3</sup>

### Resumen

El presente estudio muestra una metodología para el análisis del rendimiento de sistemas de recursos hídricos, mediante un acople de modelos estocásticos y de optimización, con el objetivo de tener una herramienta de ayuda para la planificación y gestión de la oferta y demanda de agua en cuencas hidrográficas en pleno desarrollo. Los métodos empleados exponen la fortaleza de los modelos hidrológicos estadísticos para captar patrones de comportamiento histórico de las series de caudales y sintetizar esta información mediante la generación de series probables de caudales futuros y, además, la capacidad de ligar estas series a modelos para la simulación de la gestión de sistemas de recursos mediante la optimización de redes de flujo conservativa cuyo objetivo es minimizar los déficits de suministros a las demandas de agua.

### Abstract

This study presents a methodology for analyzing the performance of water resources systems through a coupling stochastic models and models of optimization, with the aim of having a support tool for planning and management of supply and demand for water in basins in full development. Methods exposed the strength of statistical hydrological models to capture historical behavior patterns of streamflow time series and synthesize this information by generating likely future streamflow time series, and also the ability to link these series to the simulation models of water resources system management by optimizing conservative flow networks whose objective is to minimize deficits to supply water demands. .

---

<sup>1,\*</sup>Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales. Carrera de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ciencias Químicas. Universidad de Cuenca – Ecuador. Autor para correspondencia ✉: alex.aviles@ucuenca.edu.ec

<sup>2</sup>Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente, Universidad Politécnica de Valencia – España.

<sup>3</sup>Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente, Universidad Politécnica de Valencia – España.

Recibido: 29-04-2016, aprobado tras revisión: 31-05-2016

Forma sugerida de citación: Avilés, A.; Solera, A. y Paredes, J. (2016). «Análisis del rendimiento de sistemas hídricos en desarrollo mediante el acople de modelos estocásticos hidrológicos y optimización de redes de flujo». INGENIUS. N.º15, (Enero-Junio). pp. 48-57. ISSN: 1390-650X.

La aplicación de esta metodología se realizó en la cuenca del río Tomebamba en Ecuador, analizando el potencial suministro hídrico del sistema, donde se pudo demostrar la utilidad del método para manejar información probabilística para la planificación de infraestructuras de regulación en una cuenca y para gestionar sistemas de recursos hídricos con déficit de agua y con un enfoque de riesgo de insatisfacción de las demandas.

**Palabras clave:** Sistemas hídricos, modelos estocásticos, simulación, optimización, gestión del riesgo.

The application of this methodology was performed in Tomebamba river basin in Ecuador, analyzing the potential water supply system, which could demonstrate the usefulness of the method to handle probabilistic information for the reservoir planning in a watershed and water resources systems management with water deficit and with an approach of risk of dissatisfaction of the demands.

**Keywords:** Water systems, Stochastic Models, Simulation, Optimization, Risk Management.

## 1. Introducción

En los últimos tiempos ha sido un desafío para los tomadores de decisiones la asignación de los recursos hídricos [1]. El incremento de la población y la disminución de la disponibilidad de agua han agravado las competiciones entre los diferentes usos del agua, llevando a complejas situaciones donde no son fáciles las decisiones, particularmente bajo diversas condiciones naturales y deterioro de la calidad del líquido vital [2].

En consecuencia, la demanda creciente de agua en términos de cantidad suficiente y calidad adecuada, ha obligado a los planificadores a contemplar y proponer planes cada vez más ambiciosos para sistemas de recursos hídricos [3], [4]. La comprensión de la dinámica de estos sistemas y la compleja interacción de los factores y variables que gobiernan su comportamiento, exige el desarrollo de teorías, técnicas, modelos y algoritmos, mediante los cuales se pueda tener una aproximación a su realidad física [5].

En este sentido, los modelos de simulación y optimización han sido ampliamente usados en la gestión y planificación de sistemas de recursos hídricos y sistemas de embalses.

Los modelos de simulación son útiles para contestar la pregunta: ¿qué pasa si...?, evaluando el desempeño del sistema con diferentes alternativas operacionales. Mientras tanto los modelos de optimización son mejores cuando se trata de encontrar soluciones óptimas con determinados objetivos y limitaciones, no obstante, son matemáticamente más complejos que los modelos de simulación y requieren más recursos computacionales [6].

Muchos modelos son construidos para casos particulares en cuencas específicas, sin embargo, existen otros modelos más generales que integran herramientas matemáticas, sistemas de información y bases de datos para ayudar al gestor de un sistema en el proceso de toma de decisiones. Estos son los denominados sistemas de soporte de decisiones (SSD).

En [6] describe algunas herramientas computacionales para la simulación de sistemas, como el programa HEC 5 [7] actualizado a HEC RESSIM [8], también modelos de simulación dinámica como STELLA [9] y POWERSIM (Powersim, Inc.) aplicado por [10]; además, realiza una evaluación del estado del arte en modelos de optimización en sistemas de embalses, donde describe métodos de optimización no lineales y estocásticos, así como también métodos heurísticos de programación mediante algoritmos evolutivos y genéticos, junto con la aplicación de sistemas basados en reglas difusas para inferir las políticas del sistema operativo de los embalses.

Existen otros programas como el SSD AQUATOOL [11] que abarcan modelos de simulación y optimización de sistemas de recursos hídricos, cuyos resultados son un soporte para la toma de decisiones de los gestores de

cuencas. Otros ejemplos de programas que incorporan modelos de optimización en un SSD son MODSIM [12] y CALSIM [13].

También existen estudios que muestran un enfoque combinatorio de modelos, mediante la exploración y comparación de algoritmos de optimización para inferir reglas de operación de embalses o analizar sistemas de recursos hídricos [14], [15].

La adopción o construcción de una u otra metodología va a depender de la particularidad del problema, de la información disponible y de la capacidad computacional que se disponga, por esto en el presente trabajo se ha optado por metodologías para la simulación de la gestión de sistemas de recursos hídricos mediante la optimización de redes flujos conservativas acoplada a modelos estocásticos hidrológicos para analizar el rendimiento de sistemas que requieren una planificación a corto y mediano plazo.

Los modelos estocásticos han sido utilizados durante mucho tiempo para evaluar el rendimiento de sistemas de recursos hídricos, determinar capacidad de embalses, analizar la efectividad de reglas de gestión, planificar la implementación de infraestructura de regulación, generar escenarios para simular el comportamiento futuro de sistemas y otras aplicaciones más.

Estos modelos nacen por la marcada variabilidad temporal y espacial de muchos procesos y componentes en un sistema que dan cuenta que son funciones de muchos factores estocásticos, es por esto por lo que los análisis de los sistemas van más allá de los métodos convencionales deterministas [2]. En [16] señala que un rango significativo de escenarios futuros habrá sido explorado, si se generan muchas series de caudales sintéticos, cada una con una cierta probabilidad de ocurrencia.

La generación de escenarios futuros mediante series sintéticas se basa en modelos matemáticos que son capaces de reproducir las estadísticas de las series históricas, Estos modelos han sido muy estudiados por muchos autores, no solo para la generación sintética hidrológica, sino también para la predicción hidrológica.

Con estos antecedentes, el presente trabajo pretende mostrar una metodología para analizar el rendimiento de sistemas hídricos en desarrollo mediante el acople de modelos estocásticos hidrológicos y optimización de redes de flujo. La aplicación de esta metodología se realizó en la cuenca del río Tomebamba en Ecuador, analizando el potencial suministro hídrico del sistema.

## 2. Metodología

### 2.1. Modelación estocástica

Los modelos estocásticos se fundamentan principalmente en el máximo aprovechamiento de la informa-

ción de la serie histórica de un conjunto de variables, es decir, reproducir las estadísticas de las series de datos históricos medidos. El concepto clave en este tipo de modelos es la correlación temporal entre las series de datos. La estructura general del modelo se muestra a continuación [17]:

$$Y_t = f(Y_{t-1}, Y_{t-2}, \dots, Y_{t-n}, X_t, X_{t-1}, \dots, X_{t-m}, \theta) + \epsilon t \quad (1)$$

Donde  $Y_{t-i}$  vector formado por las variables de salida del sistema en el instante  $t-i$ ,  $i=0, \dots, n$ ;  $X_{t-j}$ : vector formado por las variables de entrada del sistema en el instante  $t-j$ ,  $j=0, \dots, m$ ;  $\theta$ : vector de parámetros del modelo y  $\epsilon t$ : vector de residuos o errores del modelo en el instante  $t$ . El proceso de modelado se puede resumir en los tres pasos siguientes [18]: 1. Identificación de la composición, forma y el tipo de modelo. 2. Ajuste del modelo (estimación de parámetros). 3. Diagnóstico del modelo (comprobación de la bondad de ajuste del modelo).

En general la mayoría de técnicas estadísticas y la teoría de probabilidades aplicados en hidrología son desarrolladas asumiendo variables normalmente distribuidas, porque la mayoría de curvas de frecuencia de variables hidrológicas son asimétricamente distribuidas [18], es esta la razón por lo que se debe transformar estas variables a una distribución normal antes de iniciar la modelación, esto se consigue probando múltiples funciones normalizadoras como por ejemplo la función logaritmo [ $Y_t = Ln(X_t + a)$ ], la función potencia [ $Y_t = (X_t + a)^b$ ], entre otras más.

Por otro lado, se asume que la serie a modelar debe ser estacionaria, es decir, que sus estadísticos son constantes en el tiempo al menos en media y varianza [17], es por esto por lo que se debe realizar la estandarización (estandarización en media y varianza) de la serie de tiempo si la serie no es estacionaria, para lograr esto se puede utilizar la siguiente fórmula cuando la serie es mensual:

$$Z_t = Y_t - \frac{\mu}{\sigma} \quad (2)$$

En donde,  $\mu$ : es el estimador de la media de la serie transformada  $Y_t$  y  $\sigma$ : es el estimador de la desviación típica de la serie transformada  $Y_t$ , esto se realiza para cada mes del año, es decir, se tendrá 12 estimadores de la media y 12 estimadores de la desviación típica. Con ello se tendrá una serie mensual  $Z_t$  normalizada y estandarizada de media cero y desviación típica la unidad.

Cuando se modela a escala semanal y diaria, es necesario el ajuste de series de Fourier para determinar los estimadores de la media y la desviación típica. Las series  $Z_t$  son las entradas para probar múltiples modelos estocásticos como los autoregresivos de media

móvil [ARMA (p,q)] [19], los autoregresivos de media móvil periódicos [PARMA (p,q)] [18] y otros según las características y particularidad de cada serie.

Hay que hacer notar que una vez que se ha realizado el ajuste del modelo, se deberá deshacer las operaciones efectuadas a la serie original, mediante las operaciones inversas.

A pesar de que los modelos ARMA reproducen de una manera aceptable las propiedades estadísticas históricas de series de datos, algunos autores recomiendan realizar una modelización con parámetros periódicos cuando la serie histórica es mensual [18] y los estadísticos básicos (media, desviación típica y autocorrelación) presentan significantes variaciones estacionales.

Además de probar algunos modelos, también se ensayan diferentes órdenes (p, q) para cada modelo, con el objeto de ir determinando los parámetros en cada caso (ajuste del modelo) y la comprobación de la bondad de ajuste, de tal forma para conseguir un conjunto de modelos que sean capaces de reproducir las propiedades estadísticas históricas de los datos (estadísticos básicos, sequía y almacenamiento) y esencialmente las suposiciones claves de los residuos como la normalidad y la independencia.

Finalmente, se escoge los mejores modelos para la generación de series sintéticas anuales y mensuales, mediante el criterio de información de Akaike corregido AICC [20], basado en una penalización de los modelos con mayor número de parámetros.

Los mejores modelos ajustados y validados son utilizados para generar series sintéticas, lo esencial de esta creación es conservar las propiedades estadísticas de la muestra histórica, como resultado cada muestra generada es igualmente probable que ocurra en el futuro [21].

Por esta razón estos modelos se consideran adecuados cuando los estadísticos (básicos, sequía y almacenamiento) de la serie histórica y generada son similares. Los valores de los estadísticos de la serie generada se calculan mediante un promedio de los valores correspondientes de todas las series generadas.

La finalidad de la generación de series sintéticas anuales es analizar la posibilidad de implementar infraestructura para la regulación del agua y la finalidad de la generación de series sintéticas mensuales es construir escenarios futuros para la gestión de la infraestructura planificada, el conjunto de estas series son las entradas para la simulación de sistemas de recursos hídricos.

Los estadísticos básicos que se toman en cuenta en este estudio son la media, la desviación estándar, la varianza, el sesgo, el valor mínimo y el valor máximo. Y los estadísticos de sequía que se toman en cuenta son la más larga duración de sequía y la magnitud máxima de sequía, para el cálculo de estos estadísticos se debe considerar un umbral, es decir, un valor por

debajo de ese umbral origina un déficit, siendo la secuencia la sucesión de déficits, por lo regular el valor de este umbral está relacionado con un nivel de demanda total de agua en el sistema.

Los estadísticos de almacenamiento que se toman en cuenta son la capacidad de almacenamiento (también dependiente de un nivel de demanda), el rango reajustado y el coeficiente de Hurst [22].

## 2.2. Simulación de sistemas de recursos hídricos

Como en este estudio se tratan sistemas de recursos hídricos en plena evolución, es decir, todavía tienen deficiencias en planificación y gestión, inexistencia de infraestructura adecuada, así como también carencia de reglas de gestión que maximicen la satisfacción de las demandas, se deben realizar diferentes ensayos (simulaciones con múltiples escenarios) con diferentes situaciones presentes y futuras para solventar necesidades en los sistemas, o sea, planificar un rendimiento efectivo del mismo en la actualidad y en el futuro.

Para cumplir este objetivo se ha recurrido a la simulación de la gestión a escala mensual con múltiples escenarios, mediante la construcción de esquemas de los sistemas que se traducen en redes de flujo conservativas que se optimizan cada mes (con programación lineal mediante el algoritmo OUT-OF-KILTER [23], [24] para cumplir la función objetivo de maximizar la satisfacción de las demandas, cumpliendo las restricciones de conservación de masa (continuidad) y los límites físicos de transporte de flujo en conducciones (ríos, quebradas, etc.) y capacidades de embalses.

Con este antecedente se muestra la siguiente metodología que se describe a continuación y se resume en la Figura 1.

Primero se realiza un chequeo del cumplimiento de la satisfacción de las demandas en el presente y en el futuro mediante la simulación del sistema con las aportaciones mensuales históricas llevadas a un régimen natural (suponiendo que no existirá ninguna alteración del régimen natural en el futuro), las demandas actuales y la estimación de las demandas futuras.

En caso de incumplimiento de las demandas, se deberá planificar la implementación de una infraestructura de regulación con una capacidad óptima mediante la utilización de las series sintéticas anuales. Este paso es con la finalidad de cumplir con la totalidad del recurso requerido por las demandas y es comprobado mediante la simulación del sistema en condiciones futuras, es decir, con las aportaciones mensuales históricas llevadas a un régimen natural (suponiendo que estas se presentaran en el futuro, por ausencia de cambios en el régimen hidrológico) y las demandas futuras.

En caso de que no se pueda implementar infraestructuras de regulación de gran envergadura por cuestiones físicas, ambientales, sociales o económicas,

se plantearán infraestructuras de regulación con menor capacidad, sin embargo, se corre el riesgo de incumplir con la satisfacción total de las demandas en algunos meses del período total de simulación, dando inicio a la simulación múltiple (con escenarios estocásticos) para la gestión de sistemas de recursos hídricos con riesgo de desabastecimiento de agua, las entradas para este paso son las series sintéticas mensuales y las demandas futuras estimadas, es decir, se simulará un determinado número de escenarios futuros dependiendo de cuántas series sintéticas mensuales son generadas.

Una vez realizada la simulación mensual múltiple con escenarios estocásticos se analiza los resultados determinando el grado de incumplimiento de las demandas y se planifica medidas de gestión para minimizar la insatisfacción de las mismas. Finalmente, se deberán evaluar las medidas planificadas en la fase de explotación del sistema.

El cálculo de la capacidad óptima del embalse se debe realizar mediante un análisis probabilístico de las múltiples capacidades de almacenamiento derivadas de las series sintéticas anuales y la demanda total futura estimada.

La validación de este valor se realiza simulando el sistema incluyendo el embalse planificado con capacidad ideal y con las aportaciones históricas llevadas al régimen natural, suponiendo que estas sucederán en el futuro, es decir, en esta metodología no se toma en cuenta el cambio climático y/o cambio de uso de tierra que puedan afectar el régimen hidrológico futuro.

Las redes flujo son una representación del sistema, la misma que está formada por nudos (embalses, tomas, derivaciones, etc.) unidos por arcos (quebradas, ríos, canales, etc.) por los cuales circula un flujo (caudales)  $X_{ij}$  dirigido del nudo  $i$  al nudo  $j$ . El costo por unidad de flujo circulando por el arco  $X_{ij}$  es  $C_{ij}$  y cada arco  $X_{ij}$  tiene una capacidad máxima de flujo  $U_{ij} \geq 0$  y un flujo mínimo  $L_{ij} \geq 0$ , el problema de optimización de la red puede plantearse de la siguiente manera [24]:

Minimizar:

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m C_{ij} X_{ij} \quad (3)$$

Sujeto a:

$$\sum_{j=1}^m X_{ij} - \sum_{k=1}^m X_{ki} = p_i \quad i = 1, \dots, m \quad (4)$$

$$X_{ij} \geq L_{ij} \quad i, j = 1, \dots, m \quad (5)$$

$$X_{ij} \leq U_{ij} \quad i, j = 1, \dots, m \quad (6)$$

$$U_{ij} \geq L_{ij} \geq 0 \quad i, j = 1, \dots, m \quad (7)$$

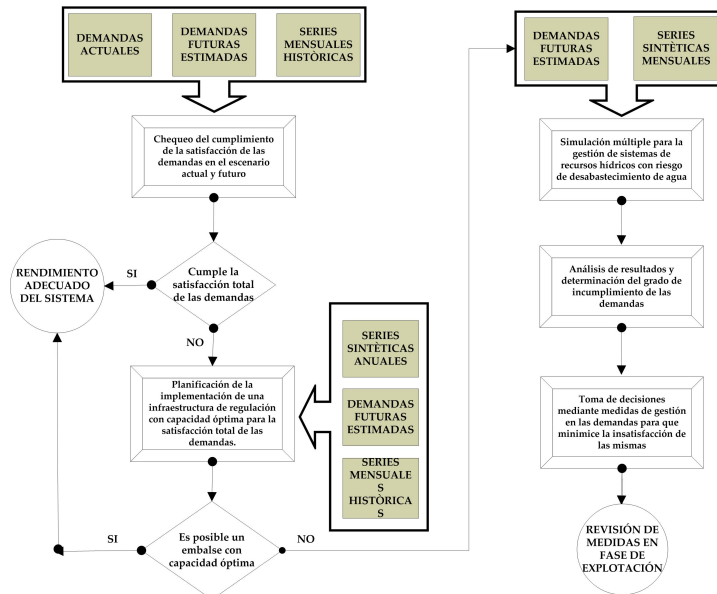


Figura 1. Servidor web basado en Arduino [3].

Donde la restricción de la ecuación (4) establece que la suma de los flujos salientes del nudo  $i$  menos la suma de los flujos entrantes al mismo, es la producción  $p_i$ , del nudo  $i$ . Si la producción es positiva el nudo es una fuente, mientras que si la producción es negativa es un sumidero.

Cuando todos los  $\pi$ ,  $i = 1, \dots, m$  son nulos, entonces se tiene una red de flujo conservativa, la cual es empleada en este estudio. Este problema de optimización es resuelto aplicando el algoritmo para redes de flujo conservativas OUT-OF-KILTER, basado en los problemas de programación lineal primal y dual [23].

Según [24], este problema de optimización se puede asemejar a sistemas de recursos hídricos, donde la formulación se transforma a una función objetivo mostrada en (8), que minimiza la suma ponderada de los déficits de suministros a zonas de demandas ( $d_{i,t}$ ), también minimiza los déficits de caudales ecológicos ( $d'_{i,t}$ ), y maximiza el volumen almacenado en los embalses ( $V_{i,N-12}$ ) al final de cada periodo de optimización elegido (Número de años  $N$  por 12 meses).

Minimizar:

$$\sum_{t=1}^{N-12} \left[ \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot d_{i,t} + \sum_{i=1}^{nc} \beta_i \cdot d'_{i,t} \right] - \sum_{i=1}^{ne} \delta_i \cdot V_{i,N-12} \quad (8)$$

Donde  $\ll n \gg$  es el número de demandas (consuntivas y no consuntivas),  $\ll nc \gg$  es el número de conducciones (ríos, quebradas y canales que pueden fijarse caudales ecológicos),  $\ll ne \gg$  es el número de embalses y los factores de ponderación son  $\alpha_i$ ,  $\beta_i$  y  $\delta_i$ , que dependen de las prioridades asignadas a cada demanda, a cada caudal ecológico, a cada embalse y la prioridad entre elementos, es decir, la prioridad entre

todas las demandas, todos los caudales ecológicos y todos los embalses.

El resultado de la resolución del problema de optimización es la asignación óptima de recursos a todos los elementos a nivel mensual.

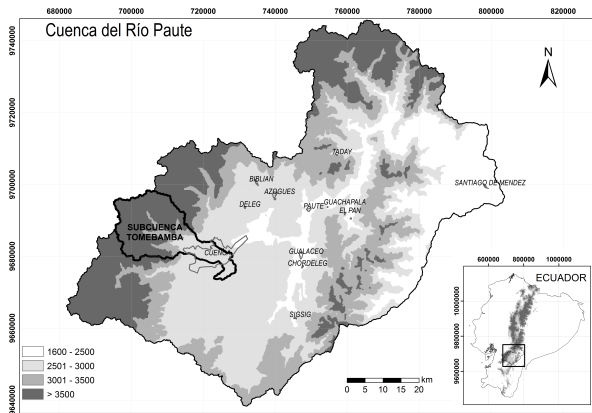
### 2.3. Acople de los modelos hidrológicos estocásticos y los modelos de simulación

Los resultados de los modelos hidrológicos estocásticos lanzan un conjunto grande de series que conservan las propiedades estadísticas de la muestra histórica. Cada una de estas series generan los potenciales escenarios futuros que son considerados en los modelos de simulación.

Finalmente, los múltiples resultados de los modelos de simulación brindan la información necesaria de una manera probabilística para analizar la situación del sistema de recursos hídricos en estudio y permiten al gestor de la cuenca, planificar medidas de gestión de oferta y demanda de agua que maximicen el rendimiento del sistema.

## 3. Caso de aplicación.

La aplicación de esta metodología se realizó en la subcuenca del río Tomebamba, perteneciente a la cuenca del río Paute en el Ecuador (Figura 2), es una cuenca de alta montaña ubicada entre 2500 y 4000 m s. n. m., la zona alta se encuentra en el Parque Nacional Cajas (considerado patrimonio natural del Ecuador), está compuesta por páramos, bosques montanos, humedales y ecosistemas característicos de los Andes tropicales.



**Figura 2.** Ubicación de la subcuenca del río Tomebamba.

La cuenca no posee infraestructuras de regulación, además tiene una gran importancia por ser la que abastece de agua a la ciudad de Cuenca (en la zona baja de la subcuenca), también abastece de agua a demandas de riego ubicadas en la zona media de la subcuenca y en mucho menor proporción a otros usos como abrevaderos de ganado y piscícolas.

La cuenca no posee infraestructuras de regulación, además, tiene una gran importancia por ser la que abastece de agua aproximadamente al 34 % de la población de la ciudad de Cuenca (200 000 habitantes en la zona baja de la subcuenca), también abastece a las demandas de riego ubicadas en la zona media de la subcuenca y en mucho menor proporción a otros usos como abrevaderos de ganado y piscícolas.

La información utilizada para la aplicación de la metodología pertenece al Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador (serie mensual de caudales históricos) y la Secretaría Nacional del Agua del Ecuador (concesiones actuales de agua para la utilización del recurso hídrico en las distintas demandas).

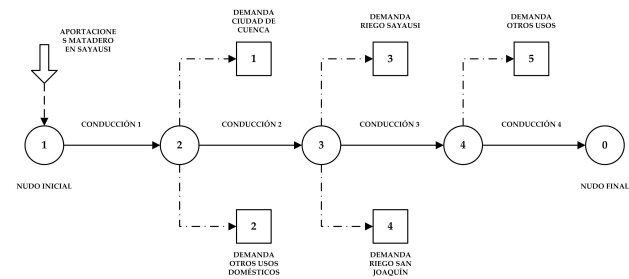
La serie mensuales histórica de caudales ( $X_t$ ) fue obtenida de la estación Matadero en Sayausí, cuya ubicación se encuentra aguas abajo de la zona alta de la subcuenca considerada como natural y sin una significativa intervención de la población. Esta serie tiene 31 años de datos históricos (1979-2009) y fue normalizada mediante una transformación a través de la función raíz cuadrada ( $Y_t = X_t^{1/2}$ ) y estandarizada ( $Z_t$ ) a nivel mensual mediante la sustracción del estimador de la media de la serie transformada ( $Y_t$ ) y la división por el estimador de la desviación típica de la serie transformada ( $Y_t$ ).

Para el proceso de modelación a escala anual se probaron varios modelos ARMA con diferentes órdenes: (1,1), (1,2), (1,3), (2,1), (2,3) y (3,3), en donde el mejor modelo según AICC fue el ARMA (1,1). A escala mensual se probaron 11 modelos PARMA [(1,0); (1,1); (1,2); (1,3); (1,4); (2,1); (2,2); (3,2); (3,3); (4,3); (4,4)], en donde los mejores modelos escogidos según el AICC fueron el modelo PARMA (1,0) para los meses

de enero, febrero, marzo, mayo, junio, septiembre y noviembre, el modelo PARMA (1,1) para los meses de abril, julio, agosto y diciembre y el modelo PARMA (1,2) para el mes de octubre.

Con el modelo ARMA (1,1) se generaron 100 series sintéticas de 31 años cada una, mientras que con los mejores modelos PARMA se generaron 100 series sintéticas de 372 meses cada una. No fue necesario generar un número elevado de series sintéticas dado que el sistema es sencillo y con un solo punto de generación [25].

Se construyó un diseño del sistema de recursos hídricos de la subcuenca del río Tomebamba para la simulación de la gestión del mismo (Figura 3), agrupando diferentes tipos de demandas, especialmente teniendo en cuenta las demandas con mayor cantidad de agua requerida, por ejemplo: el agua para consumo humano de la ciudad de Cuenca. Además, se tomó en cuenta caudales ecológicos para los diferentes cursos de agua.



**Figura 3.** Esquema del sistema de recursos hídricos de la subcuenca del río Tomebamba.

Finalmente, se priorizó la repartición del agua, poniendo en primer lugar el agua para consumo doméstico, luego el agua para riego y finalmente los otros usos.

Una vez diseñado el esquema del sistema se procedió con la aplicación de la metodología de la Figura 1. Se simuló la gestión del sistema en el escenario actual (1979-2009) y el escenario futuro (2010-2040), no cumpliendo la satisfacción total de las demandas, es por esto por lo que se planificó la implementación una infraestructura de regulación con una capacidad ideal (21 hm<sup>3</sup>), de tal forma de cumplir con todo el volumen de agua que requerían las demandas.

Sin embargo, tomando en cuenta la fragilidad ambiental de la zona alta y las ordenanzas de conservación por ser un patrimonio natural, sería poco factible un embalse de gran capacidad, por lo que se planificó un embalse con la mitad de capacidad del embalse óptimo (10 hm<sup>3</sup>), iniciando una gestión del sistema con riesgo de desabastecimiento de agua a las demandas.

El siguiente paso fue simular el sistema en estas condiciones y con 100 escenarios futuros (derivados de las series sintéticas mensuales), determinando el grado de incumplimiento de las demandas a nivel de

probabilidades y finalmente generar medidas restrictivas en la gestión de las demandas que minimicen este incumplimiento. Para facilitar la aplicación de la metodología y para la obtención de resultados se utilizó los siguientes programas: SAMS [21], SIMGES [26] y SIMRISK [27].

Hay que tener presente que la planificación del embalse solo se realizó para su capacidad y no de la ubicación del mismo.

#### 4. Resultados

Para validar los modelos estocásticos, los estadísticos de las series sintéticas anuales generadas fueron comparados con los estadísticos de la serie histórica anual, resultando una buena conservación de las propiedades estadísticas.

Por otro lado, a escala mensual, se realizó el mismo procedimiento, los estadísticos de las dos series fueron comparados, los mismos que se presentan en la Tabla 1, en este podemos observar que existe variaciones no importantes en todos los estadísticos básicos excepto en los valores mínimos de la serie, sin embargo, dado que esperaríamos menores valores de aportaciones en algunas series generadas (escenarios futuros), los análisis de cumplimiento de satisfacción de las demandas se los realizaría en las condiciones más desfavorables y por lo tanto del lado de la seguridad.

**Tabla 1.** Comparación de estadísticos básicos de la Serie Histórica Mensual y la Serie Sintética Mensual Generada de la estación Matadero en Sayausí.

Estadísticos	Serie Histórica	Serie Generada	Variación
Media	16.22	16.08	0.87 %
Desviación estándar	9.32	9.29	0.28 %
Varianza	86.82	86.59	0.26 %
Sesgo	0.84	0.86	-1.97 %
Mín	0.89	0.35	60.16 %
Max	50.65	52.54	-3.74 %

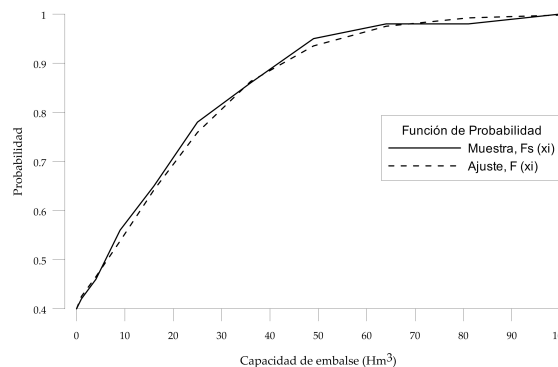
Con respecto a los estadísticos de sequía y almacenamiento, existen variaciones múltiples con distintos niveles de demanda, sin embargo, estos estadísticos de la serie histórica y generada son similares, por ejemplo, la máxima duración de déficit tiene una variación aproximada desde un 6 %, la máxima magnitud de déficit tiene una variación aproximada desde un 12 % y la capacidad de almacenamiento tiene una variación aproximada desde un 14 %.

Solo el rango reajustado tiene una variación considerable de 39 %, no obstante, el coeficiente de Hurst tiene una variación baja de 14 %.

Tomando en consideración las variaciones insignificantes de los estadísticos básicos y la baja variación de algunos estadísticos de sequía y almacenamiento, pode-

mos decir que las series sintéticas generadas mensuales son equiprobables que la serie histórica mensual.

Los resultados de los cálculos de capacidad de almacenamiento muestran que existieron 40 valores que fueron nulos (es decir, no se necesitaría infraestructura de regulación) y 60 valores no nulos, los mismos que fueron ajustados a una función de probabilidad (Figura 4).



**Figura 4.** Función de probabilidad para los valores de capacidad de almacenamiento.

Con este ajuste se pudo derivar la probabilidad de no excedencia de la capacidad de embalse planificada, así para la capacidad óptima de 21 hm<sup>3</sup> tiene una probabilidad de no excedencia del 70 % y para la capacidad factible de 10 hm<sup>3</sup> tiene una probabilidad de no excedencia del 55 %.

Los resultados de la simulación de la gestión mensual múltiple muestran que la probabilidad máxima promedio mensual de estado del embalse de 10 hm<sup>3</sup> en los tres niveles inferiores (0-1, 1-2 y 2-3 hm<sup>3</sup>) bordea el 20 % y esta probabilidad máxima recae en el mes de febrero (Figura 5), además casi un 15 % de probabilidad incurre en el nivel 0-1 hm<sup>3</sup>, puede ser que este valor sea aceptable para los gestores del sistema, sin embargo, si se desea se puede bajar estos valores a un valor límite inferior de probabilidad de estado en los niveles inferiores, restringiendo el suministro de agua a las demandas, sobre todo a las demandas menos prioritarias.

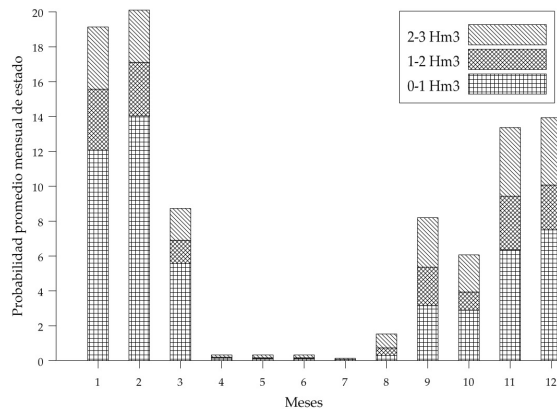
Pero todo esto va a depender de los gestores del sistema y del valor del riesgo que quieran imponerse para el sistema.

Las probabilidades de fallos (situación de insatisfacción en el suministro) de las demandas están divididas en 4 niveles (0-25 % ; 25-50 % ; 50-75 % ; 75-100 %), los mismos que representan la cantidad de suministro de agua en esa demanda, es decir el nivel 50-75 %, representa un máximo suministro de agua del 75 % del valor total de la demanda, o sea un 25 % de déficit máximo de agua.

Revisando algunos resultados tenemos que los valores máximos de probabilidad de fallo promedio mensual en los 4 niveles de la demanda de la ciudad de Cuenca

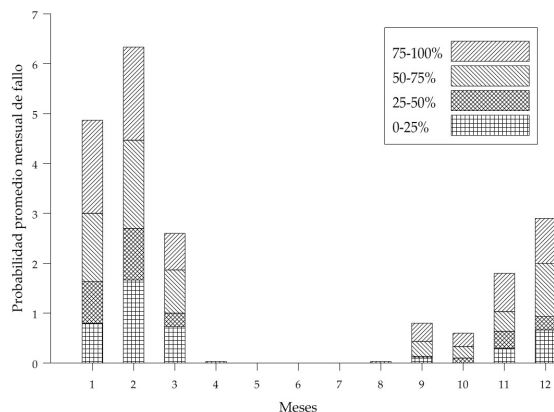


y las demandas de riego suceden en el mes de febrero con un valor de aproximadamente 6 % y 8 % respectivamente (Figuras 6 y 7), incluso hay un valor de probabilidad de fallo promedio mensual de casi 7 % en el nivel más crítico (75 % de déficit en el suministro) de las demandas de riego.



**Figura 5.** Probabilidad promedio mensual de estado del embalse de 10 hm<sup>3</sup> de los niveles 0-1, 1-2 y 2-3 hm<sup>3</sup>.

De igual manera, podría interesar para la gestión futura del sistema bajar el valor de estimación de probabilidad de fallo en las demandas (sobre todo de las prioritarias), previendo medidas y reglas en la gestión de la demanda futura, incluso sacrificando la satisfacción total de las demandas menos prioritarias. No obstante, esto dependerá del nivel de riesgo que deseen imponerse los gestores del sistema para la insatisfacción en las demandas y el sistema en su conjunto.



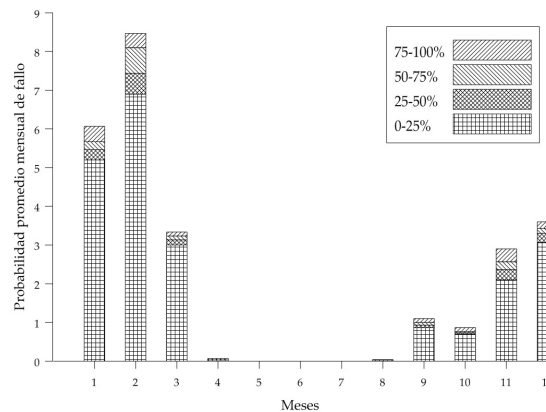
**Figura 6.** Probabilidad promedio mensual de fallo de la demanda de la ciudad de Cuenca.

## 5. Conclusiones

La metodología que se ha propuesto constituye una herramienta de soporte para los gestores del agua a nivel de cuencas hidrográficas que necesitan una planificación para las condiciones futuras de tal manera

de optimizar el rendimiento de sistemas de recursos hídricos que están en plena evolución.

La incorporación de componentes probabilísticos para generar alternativas en la oferta y demanda del agua en sistemas de recursos hídricos favorece a una visión más integral de los problemas y necesidades que se puedan presentar en el futuro y ayuda a los tomadores de decisiones para la identificación de reglas adecuadas en la gestión y planificación del agua en cuencas hidrográficas.



**Figura 7.** Probabilidad promedio mensual de fallo de las demandas de riego Sayausí y San Joaquín.

En la aplicación del caso de estudio se han extraído algunas enseñanzas, por ejemplo, la utilidad de la metodología para planificar infraestructuras de regulación y poder simular situaciones en condiciones óptimas y factibles, dependiendo de las características físicas, económicas, sociales y ambientales en una cuenca hidrográfica.

Por otro lado, la aplicación de esta metodología muestra una herramienta eficaz en la gestión de sistemas con escasez de recurso hídrico, proponiendo medidas para disminuir el riesgo de desabastecimiento de agua a demandas prioritarias.

Finalmente, indicar que se pueden desarrollar algunos trabajos futuros explorando a profundidad algunas suposiciones que se hicieron en el presente estudio, como la incorporación de la variación del régimen hidrológico por cambios en el uso de la tierra o cambios climáticos y la estimación de las demandas futuras con métodos más robustos.

## Referencias

- [1] Y. P. Li, G. H. Huang, G. Q. Wang, and Y. F. Huang, "Fswm: A hybrid fuzzy-stochastic water-management model for agricultural sustainability under uncertainty," *Agric. Water Manag.*, vol. 96, no. 12, pp. 1807–1818, December 2009.
- [2] Y. Huang, Y. P. Li, X. Chen, A. M. Bao, and M. Zhou, "Simulation-based optimization method

- for water resources management in tarim river basin, china,” *Procedia Environ. Sci.*, vol. 2, pp. 1451–1460, January 2010.
- [3] Y. Li and G. Huang, “Inexact multistage stochastic quadratic programming method for planning water resources systems under uncertainty,” *Environ. Eng. Sci.*, vol. 24, no. 10, pp. 1361–1378, 2007.
- [4] D. P. Loucks, J. R. Stedinger, and D. A. Haith, *Water Resource Systems Planning and Analysis*, Prentice-Hall, Ed., 1981.
- [5] J. Ochoa, “Modelo estocástico de redes neuronales para la síntesis de caudales aplicados a la gestión probabilística de sequías (doctoral dissertation, tesis doctoral dirigida por: D. joaquín andreu álvarez y. d. rafael garcía bartual),” Ph.D. dissertation, Presentada en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Valencia, 2002.
- [6] J. W. Labadie and M. Asce, “Optimal operation of multireservoir systems?: State-of-the-art review,” *J. Water Resour. Plan. Manag.*, vol. 130, no. 2, pp. 93–111, 2004.
- [7] V. R. Bonner, “Hec-5: Simulation of microcomputers). model-simulation,” 1989.
- [8] J. Klipsch, “Hec-ressim: Capabilities and plans,” *Second Federal Interagency Modeling Conf, Las Vegas, Nevada*, 2002.
- [9] S. Stein, C. Miller, S. Stout, and J. Webb, “Big sandy river basin stella reservoir regulation model,” *Proc., World Water and Environmental Congress. ASCE, Orlando, Fla*, 2001.
- [10] K. Varvel and K. Lansey, “Simulating surface water flow on the upper rio grande using powersim 2001,” *SAHRA-NSF Science and Technology Center for Sustainability of Semi-Arid Hydrology and Riparian Areas*, 2002.
- [11] J. Andreu, J. Capilla, and E. Sanchís, “Aquatool, a generalized decision-support system for water-resources planning and operational management,” *J. Hydrol.*, vol. 177, no. 3-4, pp. 269–291, 1996.
- [12] J. Labadie, M. Baldo, and R. Larson, “Modsim: decision support system for river basin management: Documentation and user manual.” 2000.
- [13] A. Munevar and F. Chung, “Modeling california’s water resource systems with calsim (asce),” *In Proceedings of 29th Annual Water Resources Planning and Management Conference. ASCE Conf. Proc.*, p. 95, 1999.
- [14] J. Paredes, A. Solera, and J. Andreu, “Reglas de operación para sistemas multiembalse, combinando métodos heurísticos y redes de flujo,” *Tecnol. y Ciencias del Agua*, vol. 23, no. 3, pp. 151–164, January 2008.
- [15] E. S. Camacho and J. Andreu, “Optimización de la expansión de un sistema de recursos hídricos utilizando las metodologías del algoritmo genético y el recocido simulado,” *Ing. hidráulica en México*, vol. 16, no. 2, pp. 17–26, 2001.
- [16] S. J. Burges, “Simulation of water resource system. proceedings of the national workshop on reservoir systems operations.” University of Colorado, Boulder, Colorado, August 13-17 1979, pp. 136–165. [Online]. Available: <https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Biometric/MQ-4%20Ver1.3%20-%20Manual.pdf>.
- [17] T. Estrela, “Modelos matemáticos para la evaluación de recursos hídricos,” *CEDEX*, 1992.
- [18] J. D. Salas, “Applied modeling of hydrologic time series,” *Water Resources Publication*, 1980.
- [19] J. Box and G. Jenkins, “Reinsel. time series analysis, forecasting and control.” Tercera. NJ: Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, USA, 1994.
- [20] C. M. Hurvich and C.-L. Tsai, “Regression and time series model selection in small samples,” *Biometrika*, vol. 76, no. 2, pp. 297–307, June 1989.
- [21] O. Sveinsson, J. D. Salas, W. Lane, and D. Frevert, “Stochastic analysis, modeling, and simulation (sams) version 2007, user’s manual,” 2007.
- [22] H. Hurst, “Long-term storage capacity of reservoirs,” *Trans. Amer. Soc. Civ. Eng.*, vol. 116, pp. 770–808, 1951.
- [23] D. Cattrysse, “Linear programming and network flows m.s. bazaraa, j.j. jarvis and h.d. sherali wiley, new york, 1990, xiv+684 pages, £15.95, second edition (first edition, 1977), isbn 0-471-63681-9, cloth available at £43.20,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 50, no. 1, 1991.
- [24] J. Andreu, “Conceptos y métodos para la planificación hidrológica.” *Barcelona, España*, 1993.
- [25] S. Sánchez, J. Andreu, and A. Solera, “Gestión de recursos hídricos con decisiones basadas en estimación del riesgo,” *Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia*, 2001.
- [26] J. Andreu, A. Solera, J. Capilla, and J. Ferrer, “Modelo simges para simulación de cuencas. manual de usuario v3. 00,” *Universidad Politécnica de Valencia*, 2007.
- [27] J. Andreu, A. Solera, J. Capilla, and S. Sánchez, “Modelo simrisk de simulación múltiple de la gestión de recursos hídricos: Manual de usuario v 2.4,” *Editorial UPV, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia-España*, 2004.