



Estimación de caudales medios mensuales mediante la generación estocástica y transformación lluvia-escorrentía

Francisco Mafla Chamorro¹

Facundo Ganancias²

Andrés Rosero Legarda³

Resumen

Este estudio se basa en estimaciones hidrológicas en cuencas no aforadas y con poca información disponible, a través de la aplicación de un modelo estocástico para la generación de precipitación mensual; estas fueron transformadas a caudal mediante el método conceptual IPHII-MEN en las cuencas Chico y Las Tunas, provincia de Catamarca, Argentina. Las estaciones utilizadas fueron Motegasto y El Alto; para el ajuste de los modelos fueron utilizados 18 y 12 años, mientras que, para la validación, fueron empleados registros de 4 y 9 años, respectivamente. Para la precipitación mensual se utilizó el modelo estocástico de Thomas Fiering, el cual genera secuencias sintéticas con estructuras correlaciones de mes a mes; asimismo, se tuvo en cuenta el método de IPH-II MEN que se basa en el algoritmo de separación de escurrimiento. Los resultados obtenidos indicaron que existe confiabilidad, pues los valores de coeficientes de correlación estuvieron entre 0.6 y 0.7 para el modelo estocástico y 0.95 y 0.87 para el modelo IPHII-MEN. Con esto se puede decir que, estas metodologías son de gran importancia y tienen certeza al momento de predecir escenarios futuros que permitan un buen ordenamiento territorial y gestión del riesgo en el entorno del recurso hídrico.

Palabras clave: modelo matemático; estocástico; lluvia-escorrentía; caudales medios; lluvias sintéticas.

¹ Universidad Mariana, Programa de Ingeniería Ambiental. Pasto, Colombia. fmaffla@umariana.edu.co

² Universidad Católica de Córdoba, Programa de Ingeniería Civil. Córdoba, Argentina. facundoganancias@gmail.com

³ Universidad Mariana, Programa de Ingeniería Ambiental. Pasto, Colombia. andresroserolegarda@gmail.com



Introducción

Frecuentemente, los proyectos de planificación de cuencas hidrográficas requieren una información que permita tomar decisiones acertadas para su manejo. Dentro de la información por generar, están los caudales de las fuentes principales y sus afluentes, bien sean máximos, medios o mínimos y, para diferentes intervalos de tiempo (horario, diario, mensual, anual, entre otros.)

En numerosas ocasiones se presenta la ausencia de estos datos y, por consiguiente, la falta de información. En casos como estos, la transformación lluvia-caudal se muestra como una alternativa para generar los caudales de las fuentes en puntos específicos, a partir de información básica como: series de lluvia, suelos y morfología de las cuencas (Carvajal et al., 2007).

Varios de los estudios en la ingeniería hidrológica se basan en caudales en intervalos mensuales; la escasez de esta información hace que se utilice los modelos de balance hídrico para su obtención, resaltando su uso en aplicaciones como: reconstrucción de hidrología de las cuencas, cambio climático, evaluación de los patrones estacionales y geográficos de suministro y demanda (Roldán, 2009).

Por ello, para cuantificar la disponibilidad hídrica en cuencas sin información hidrométrica se requiere proponer metodologías para la estimación de datos tanto pluviométricos como de caudales mensuales, que permitirán una correcta toma de decisiones frente a su uso y manejo. Ante esta ausencia de datos que ocurre no solo en el territorio argentino sino a lo largo de Sudamérica, se ve la necesidad de implementar métodos estocásticos que permitan generar lluvias sintéticas para series incompletas o, predecir posibles comportamientos futuros, los cuales harán posible mejorar la planificación de cuencas, diseños ingenieriles, proyectos de razonamiento o prevención ante desastres.

Las metodologías propuestas para su desarrollo se basan en la generación de lluvias mensuales mediante el modelo Thomas Fiering (estocástico) y su transformación con el modelo precipitación-escorrentía IPH-II Men, teniendo como objetivo, generar series de 100 años de caudales mensuales para las cuencas Río Chico y Arroyo Las Tunas, provincia de Catamarca, Argentina, a partir de información pluviométrica disponible en la zona de estudio de 20 y 30 años.

Desarrollo

Zona de Estudio

- **Cuenca del río Chico**

La cuenca del río Chico se desarrolla en la parte media de la pendiente oriental de la Sierra de Ancasti, entre los 28° 52' y 28° 58' de latitud sur y, entre los 65° 25' y 65° 32' de longitud oeste. A la salida del macizo montañoso, el curso de agua ingresa a la planicie oriental de la provincia de Catamarca, en las proximidades de la localidad de Icaño.

El sistema hidrográfico de la cuenca es de carácter endorreico, con pérdida de caudales por infiltración en el piedemonte asociado, tras un corto recorrido a partir del frente de sierra. La red de drenaje es de alta densidad, provocada por la baja permeabilidad del basamento rocoso cristalino que domina la cuenca, variando según el tipo litológico en el que tiene desarrollo. Se observa permeabilidad secundaria por fracturación de las rocas.

Figura 1

Ubicación esquemática de las cuencas de los ríos Chico (elipse inferior) y Las Tunas (elipse superior) en la provincia de Catamarca, Argentina



- **Cuenca del Arroyo Las Tunas**

La cuenca del Arroyo Las Tunas se desarrolla en la pendiente oriental de la Sierra de Ancasti en su extremo norte, entre los $28^{\circ} 14'$ y $28^{\circ} 22'$ de latitud sur y los 65°



31' y 65° 23' de longitud oeste, con dirección de escurrimiento sur-norte e ingreso a la planicie oriental de la provincia de Catamarca.

El sistema hidrográfico es de carácter endorreico, con pérdida de caudales por infiltración en el piedemonte asociado. Ello ocurre tras un corto recorrido a partir del frente de sierra, explayando inmediatamente al oeste de la población de Bañado de Ovanta en la cuenca media sobre la divisoria; este se localiza en la población de Villa El Alto.

En respuesta a las condiciones geológicas, la red de drenaje es densa, como resultado al bajo grado de permeabilidad secundaria por fracturación del material rocoso. Se observa variaciones en bajo grado, según los distintos tipos litológicos, siendo algo menor cuando existe pérdida de masividad por foliación por esquistosidad. En la Tabla 1 se presenta un resumen de las características fisiográficas más importantes de las cuencas mencionadas.

Tabla 1

Características fisiográficas de las cuencas Río Chico y Las Tunas

Parámetro	Río Chico	Las Tunas
Área (Km ²)	126.3	65.9
Extensión del curso principal (Km)	39.5	22.75
Altura máxima (m)	1350	1680
Altura mínima (m)	450	910
Diferencia de Alturas (m)	900	770
Pendiente media cauce ppal (%)	2.28	3.85
Pendiente media cuenca (%)	16	14.5

Identificación de información pluviométrica disponible

Para el desarrollo del presente estudio, se contó con informaciones de precipitaciones diarias de las estaciones pluviométricas El Alto y Motegasta. La primera de ellas está ubicada en proximidades de la cuenca del río Las Tunas, mientras que la siguiente corresponde a la cuenca del río Motegasta, vecino del río Chico. Cabe destacar que todas estas estaciones se sitúan en la provincia de Catamarca.

La serie de valores diarios de la estación El Alto correspondió al período 1977-2004, de los cuales solamente 20 años estuvieron en condiciones de ser procesados estadísticamente. Por su parte, la estación pluviométrica Motegasta presentó registros en el período 1970-2004, de los cuales únicamente 30 años presentaron condiciones de ser analizables estadísticamente.



Determinación de caudales medios mensuales

La situación imperante en las cuencas de los ríos Chico y Las Tunas se caracteriza por falta de informaciones hidrológicas. Sin embargo, la necesidad de dimensionamiento de los embalses de ambas presas, así como también la conveniencia de analizar su manejo de manera eficiente, tornan indispensable disponer de estimaciones correspondientes a los caudales medios mensuales. Por lo tanto, para tal fin fueron aplicados modelos matemáticos estocásticos y determinísticos-conceptuales, que se describe a continuación:

Modelos matemáticos empleados

- Modelo Thomas-Fiering

El método de Thomas-Fiering (Clarke, 1973) es un modelo de generación de secuencias sintéticas con una estructura correlacional mes a mes no estacionaria. Este método consiste en el uso de doce ecuaciones de regresión lineal, de las cuales cada una corresponde a un mes del año. Así, por ejemplo, se tiene valores de los diferentes eneros que estarán correlacionados con los valores de los respectivos diciembres y esto, similarmente, para cada mes del año. Ello es representado mediante la ecuación (1).

$$p_{i+1} = \underline{p}_{j+1} + b_j(p_i - \underline{p}_j) + z_i S_{j+1} \sqrt{(1 - r_j^2)} \quad (1)$$

...donde:

p_i y p_{i+1} : son las precipitaciones durante el i^{th} y $(i+1)^{\text{th}}$ mes respectivamente (la nomenclatura $^{\text{th}}$ corresponde a la literatura de lengua inglesa e indica el orden de aparición del mes); y son las precipitaciones medias mensuales durante el j^{th} y $(j+1)^{\text{th}}$ mes respectivamente, dentro de un ciclo anual respectivo de 12 meses; b_j : es el coeficiente de regresión que estima precipitaciones en el $(j+1)^{\text{th}}$ mes desde el j^{th} mes; Z_i : es una desviación normal aleatoria con media 0 y varianza unitaria; S_{j+1} : es la desviación estándar de las precipitaciones mensuales en el $(j+1)^{\text{th}}$ mes y r_j : es el coeficiente de correlación entre las precipitaciones en el j^{th} y $(j+1)^{\text{th}}$ meses.

El empleo de este modelo para la generación de serie de lluvias mensuales supone la toma de doce años de registro, los cuales son el número mínimo que necesita el modelo para representar aproximadamente la realidad.

- Balance Hídrico

El modelo de balance hídrico aplicado en la cuenca Motegasta tuvo como fin, la estimación de caudales medios mensuales generados en la cuenca, con fines de



ser empleados en las etapas de ajuste y verificación del modelo de transformación lluvia-caudal mensual propuesto.

Para efectuar la evaluación de dichos caudales, se contó con:

- Curvas del Embalse Cota – Volúmenes
- Cota – Superficies
- Registros Diarios de Niveles de Embalse
- Registros Diarios de Lecturas de Escala en Canal de Salida del Embalse
- Geometría Conforme a Obra del Perfil de la Cresta del Vertedero
- Evaporación Media Mensual de la Estación Bella Vista, y
- Precipitaciones Pluviométricas en la Cuenca.

La metodología de cálculo de los aportes tuvo en cuenta que los niveles del embalse varían a lo largo del tiempo, como resultado del balance entre caudales afluentes, descargas controladas, descargas por vertedero, pérdidas por evaporación y por infiltración.

La ecuación de continuidad del embalse, en un cierto período de tiempo, fue representada mediante la ecuación (2).

$$V_F = V_I + V_{AP} - V_{DES} - V_{VERT} - V_{EVAP} - V_{FILT} \quad (2)$$

...donde: V_F = Volumen del Embalse al final del período; V_I = Volumen del Embalse al principio del período; V_{AP} = Volumen aportado por el río Motegasta; V_{DES} = Volumen descargado por la Toma; V_{VERT} = Volumen descargado por Vertedero; V_{EVAP} = Volumen perdido por Evaporación; V_{FILT} = Volumen perdido por Filtraciones del Embalse.

A partir de la información disponible, se puede conocer día a día, cuáles son los volúmenes y superficies iniciales y finales del embalse. Los volúmenes entregados por la toma están registrados y, los volúmenes entregados por el vertedero, son calculables a partir del registro de niveles diarios, cuando el embalse se encuentra por encima del nivel de la cresta vertedora y, con un conocimiento adecuado de su geometría.

Por otra parte, las pérdidas por evaporación son proporcionales a la superficie media de embalse en cada momento, valor que se conoce en cada periodo. Las pérdidas por filtraciones no pudieron ser estimadas con los elementos de juicio disponibles, pero teniendo en consideración la naturaleza de la roca que conforma el vaso, se concluyó que serían de un orden de magnitud inferior, es decir, despreciables.



- Modelo IPH-II Mensual

Este modelo propuesto por Tucci (1998) se basa en el algoritmo de separación de escurrimiento desarrollado por Berthelot (1970). El referido autor utilizó la ecuación de continuidad en combinación con la ecuación de Horton y una función empírica para la percolación. Tucci amplió el algoritmo de infiltración y presentó un análisis de sensibilidad de dichos parámetros. Este modelo está compuesto por los siguientes algoritmos de pérdidas por evaporación e intercepción; separación de los escurrimientos; propagación del escurrimiento superficial, propagación subterránea y, optimización de parámetros.

- Evaporación e Intercepción

De la precipitación que llega a la superficie, parte es perdida por evaporación y parte es retenida por la intercepción. El total interceptado es representado por un reservorio que tiene la capacidad $R_{\text{máx}}$ y una variable de estado R_t . La precipitación restante es la entrada al algoritmo de separación de escurrimiento.

Cuando la precipitación no es suficiente para atender la evapotranspiración potencial, parte es atendida por el reservorio de las pérdidas y, el restante puede ser retirado del suelo, de acuerdo con su estado de humedad. La salida de agua del suelo es obtenida por una relación lineal entre el porcentaje de la evapotranspiración potencial y la humedad del suelo, según la ecuación (3).

$$Es(t) = \frac{EP(t) \cdot S(t)}{S_{\text{máx}}} \quad (3)$$

...donde: $Es(t)$ es la evapotranspiración de la superficie en el tiempo t ; $EP(t)$ es la evapotranspiración potencial; $S(t)$ es el estado de humedad en la parte superior del suelo; $S_{\text{máx}}$ es la capacidad de humedad máxima del suelo, y t es el tiempo.

- Separación de los volúmenes

La parte de la precipitación resultante puede generar escurrimiento superficial o, infiltrarse en el subsuelo. La parte de agua que se precipita sobre las áreas impermeables genera escurrimiento superficial, sin que ocurra infiltración y viceversa. Por lo tanto, es necesario diferenciar las partes de la cuenca con superficies impermeables de aquellas con superficies permeables; para ello se utilizó un parámetro denominado AINP, el cual varía entre 0 y 1.

De la parte que precipita sobre las áreas permeables, es necesario establecer el volumen infiltrado, el percolado para el acuífero y, el que genera escurrimiento superficial. Considerando la parte superior del suelo donde el mismo puede quedar saturado o no saturado y siendo $S(t)$ el estado de humedad de esta parte, $I(t)$ la infiltración y $T(t)$ la percolación en el tiempo t , la continuidad de flujo puede ser representada por la ecuación (4).



$$\frac{dS}{dt} = I(t) - T(t) \quad (4)$$

La infiltración puede ser obtenida por la ecuación (5) de Horton y, la percolación, por la ecuación (6).

$$I(t) = Ib + (Io - Ib) \cdot h^t \quad (5)$$

$$T(t) = Ib \cdot (1 - h^t) \quad (6)$$

...donde: Ib es la capacidad de infiltración cuando el suelo está saturado; Io es la capacidad de infiltración del suelo cuando la humedad es So; $h = e^{-k}$, y k es un parámetro que caracteriza el decaimiento de la curva exponencial de infiltración y, depende de las características del suelo.

De las ecuaciones (4), (5) y (6) e integrando en el intervalo $t = 0$ hasta t, resulta la ecuación (7).

$$S = So + \frac{Io \cdot (h^t - 1)}{\ln(h)} \quad (7)$$

...donde So es la capacidad de campo (este modelo adopta un valor igual a 0).

Igualando el término h^t en las ecuaciones (5) y (6) y sustituyendo en la ecuación (7) resultan las ecuaciones que relacionan el almacenamiento con la infiltración y la percolación, ecuaciones (8) y (9).

$$S(t) = a_i + b_i \cdot I(t) \quad (8)$$

$$S(t) = b_t \cdot T(t) \quad (9)$$

...donde a_i , b_i y b_t dependen de Io, Ib y h.

- Escurrimiento superficial

El escurrimiento es calculado con base en el método de Clark, que utiliza el histograma tiempo área para tener en cuenta la traslación y el modelo de reservorio lineal simple para el amortiguamiento. Por otra parte, el Reservorio Lineal Simple es representado por las ecuaciones (10) y (11).



$$dS = \frac{V_s}{dt} - Q_s \quad (10)$$

$$S = K_s - Q_s \quad (11)$$

...donde, K_s es el tiempo medio de traslado dentro del reservorio.

- Escurrimiento subterráneo

La propagación del escurrimiento subterráneo es obtenida con base en la ecuación (10), donde K_s es substituido por K_b y V_s por V_p .

- Algoritmos de Optimización

El modelo utiliza opcionalmente la optimización de Rosembrock.

- Condiciones Iniciales

Como condición inicial indispensable del modelo, es la entrada de valores de $V(t = 0)$, $Q_{subt}(t = 0)$, $Q_s(t = 0)$. Considerando que la cuenca está en estiaje y el escurrimiento superficial no existe, $Q_s(t = 0) = 0$, y $Q_{subt}(t = 0) = Q_{obs}$, donde Q_{obs} es el caudal observado en el inicio de la simulación. Q_{obs} es conocido en el período de ajuste. Para otros intervalos se puede informar el valor del caudal inicial deseable para simular el hidrograma. Aún dentro de la consideración de estiaje, se puede admitir que el flujo subterráneo es de la parte superior del suelo estando en régimen permanente, y $T = Q_{subt}(t = 0)$. Con base en la ecuación (9) se puede estimar $S(t) = 0$.

- Parámetros

Los parámetros utilizados por el modelo son los siguientes: Algoritmos de las pérdidas y evaporación; Separación del escurrimiento.

Dentro de los algoritmos de Pérdidas y Evaporación, el parámetro $R_{m\acute{a}x}$ varía con las características de las cuencas hidrográficas. Crawford y Linsley (1966) presentaron valores de retención en razón de la interceptación vegetal. En este parámetro se engloba otras pérdidas, pudiéndose asumir valores mayores.

El valor $S_{m\acute{a}x}$ es obtenido por el uso de la ecuación (8) para $I = I_b$, o sea cuando el suelo alcanza el grado de saturación, resultando la ecuación (12).

$$S_{m\acute{a}x} = \frac{-I_o}{\ln \ln(h)} \quad (12)$$



En la separación de escurrimientos, los parámetros son I_0 , I_b , y h . Estos parámetros son los más sensibles en el control de volúmenes de los hidrogramas.

Por otra parte, dentro de los parámetros de escurrimiento superficial, el parámetro AINP de áreas impermeables debe ser estimado con base en informaciones existentes en la cuenca hidrográfica. Cuando la distribución espacial de las áreas impermeables dentro de la cuenca es considerada, estos valores pueden ser estimados por subcuencas o isócronas. Los parámetros del modelo de escurrimiento superficial son el tiempo de concentración y el histograma tiempo-área.

Finalmente, en el escurrimiento subterráneo y, considerando el modelo de reservorio lineal simple, K_b es el parámetro que caracteriza el traslado dentro del reservorio. Para estimar este valor a partir de los datos observados locales de cuencas vecinas se debe utilizar la misma técnica para la determinación del coeficiente de recesión.

Generación de lluvias mensuales

La determinación de caudales medios mensuales en las cuencas del río Chico y Las Tunas se inició con la generación de serie de lluvias mensuales a partir de series diarias existentes de 23 y 29 años, respectivamente. Dicha generación fue realizada para periodos más extensos a aquellos de los datos disponibles en las estaciones pluviométricas correspondientes (Motegasta y El Alto, correspondientemente). Para esta tarea se empleó el modelo empírico estocástico de Thomas-Fiering (Clarke, 1973) previamente descrito.

Para el ajuste del modelo fueron empleados, en cada caso, períodos de 18 años y 12 años respectivamente (correspondientes a los períodos 1983-2000 y 1977-1988) en las estaciones Motegasta y El Alto. Para la verificación del modelo fueron empleados los registros de 4 y 9 años, correspondientes a los períodos 2001-2004 y 1997-2005.

Posteriormente a dicha verificación y corroborando la aceptabilidad de la misma, se procedió a generar dos series para cada una de las estaciones. Para la estación Motegasta se generó una serie de 78 años que, adicionada a los 22 años de registros existentes, completó una serie de 100 años. De igual forma se procedió para la estación El Alto, con la salvedad de que esta generación tuvo una extensión de 88 años para que, con los doce años de registro existente, se conformara una serie total de 100 años de precipitación.

Transformación lluvia-escorrentía

Una vez obtenidas las precipitaciones mensuales correspondientes a las cuencas del río Chico y Las Tunas, se procedió a realizar una simulación de la transformación de tipo Lluvia-Caudal utilizando el modelo de Transformación mensual IPHII-Men (Tucci, 1998) descrito con anterioridad.



Como fase inicial del proceso de transformación lluvia-caudal, fue considerado el ajuste y verificación del modelo. Para la fase de ajuste de parámetros se utilizó información correspondiente a doce años (período 1983-1994), en los cuales se dispuso estimaciones de lluvias medias mensuales y caudales medios mensuales, estos últimos obtenidos con base en un balance hidrológico efectuado sobre el Dique Motegasta. Para la verificación fueron contemplados diez años (período 1995-2004).

Una vez verificada la aceptabilidad de los resultados alcanzados, se procedió a la generación de caudales medios mensuales, utilizando como datos de entrada, las precipitaciones generadas por el modelo de Thomas Fiering y la evaporación promedio anual de las estaciones Ipizca y Júmeal, la cual fue distribuida anualmente, considerando el comportamiento temporal verificado en la estación Bella Vista.

Series de precipitaciones medias consideradas

Como ya se mencionó, las precipitaciones medias consideradas fueron generadas por medio de un modelo estocástico empírico basado en las series de precipitaciones de las estaciones Motegasta (1982 a 2004) y El Alto (1977 a 2005); cabe destacar que, la última estación, no registró datos en seis años (1989, 1990, 1991, 1993, 1994 y 1995), mientras que, en los años 1992 y 2000, presentó datos solo en algunos meses.

Resultados

Generación de lluvias sintéticas

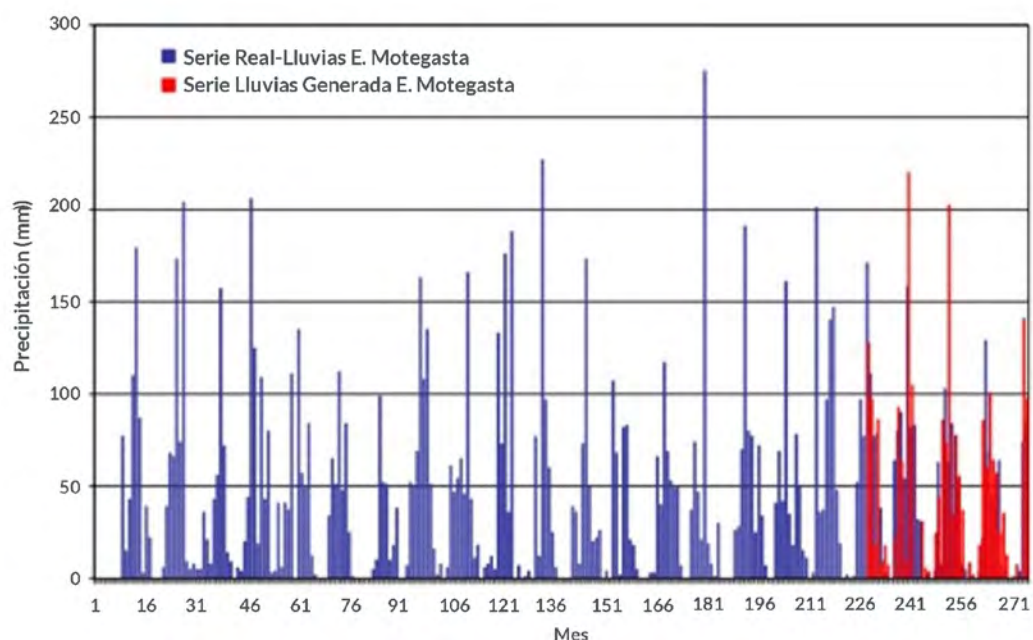
Las precipitaciones medias consideradas fueron generadas por medio de un modelo estocástico empírico basado en las series de precipitaciones de las estaciones Motegasta y El Alto. Los diferentes parámetros del modelo de generación fueron ajustados con dicha información, obteniendo los valores de caudal medio mensual, desviación estándar, correlación y bj.

La verificación fue realizada como ya se describió, encontrando un coeficiente de correlación entre los valores generados y los observados, de 0.7 para la estación de Motegasta y, 0.6 para El Alto.

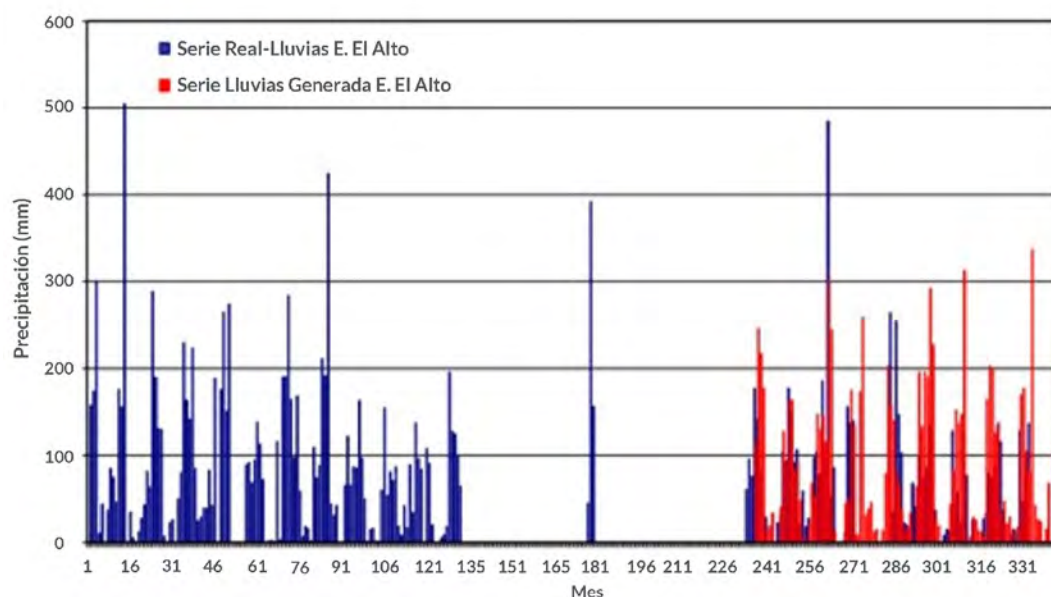


**Figura 2**

Verificación Modelo Thomas Fiering- Lluvias Río Chico

**Figura 3**

Verificación Modelo Thomas Fiering- Lluvias Las Tunas



Una vez ajustado el modelo, se procedió a generar las respectivas series de precipitaciones para un periodo de 100 años. Estos registros generados fueron utilizados como información de entrada en el modelo de transformación lluvia-caudal mensual, con el fin de generar las series de caudales medios mensuales necesarias para el análisis de manejo de embalse.



Ajuste y verificación del modelo Thomas Fiering

- Cuenca Río Motegasta

La determinación de caudales se realizó por balance hídrico, teniendo en cuenta el modelo matemático de balance hídrico planteado. Con base en la información descrita, a continuación, se procedió a generar la serie de caudales medios mensuales. Estos valores fueron utilizados en conjunto con las precipitaciones y evaporaciones de la misma cuenca, para ajustar el modelo de transformación mensual IPHII-Men.

- Curva Volúmenes – Superficie – Cota de Embalse

De la construcción de la obra del dique de Motegasta se dispuso la curva de Volumen-Superficie-Cota del embalse, así como también algunos parámetros de operación.

- Vertedero

De los planos de diseño se obtuvo la geometría del proyecto. De este se desprende que la cresta del vertedero tiene una longitud de 136.80 m, con una cota de 416.50 uniforme. Conforme a la geometría, se dedujo que se trata de un perfil USBR. Ello fue considerado para encontrar la altura de la carga de diseño, punto de partida para el cálculo de la ley de gasto. Luego de sucesivas aproximaciones se obtuvo que la carga de diseño de la cresta es de 1.15m.

Posteriormente, se efectuó dos relevamientos del perfil longitudinal del vertedero obteniéndose cada 5 m el nivel de la cresta y la profundidad de aguas arriba; los resultados obtenidos en ambos relevamientos fueron, a los efectos prácticos, coincidentes.

De acuerdo con los registros, el inicio de trabajo del vertedero es cuando el embalse supera la cota 416.41 m s.n.m. De esta manera, se adjudicó al punto más bajo de la cresta relevada esa cota y se asoció el resto del relevamiento al mismo plano de referencia.

Con posterioridad a ello, la totalidad de la estructura fue dividida en tramos de vertedero, en cuyo centro se encontró el punto de cresta relevado, determinando así, en cada punto de relevamiento de la cresta, la ley de gasto en función de la carga sobre la cresta y la profundidad de aproximación. Integrando luego para un mismo nivel de embalse el caudal que eroga cada uno de los tramos de vertedero, se obtuvo la ley de gasto.

- Pérdidas por Evaporación:

Al no existir datos de evaporación en el embalse, se tomó valores de alturas de evaporación correspondiente a la estación Bella Vista, a los efectos de contar con un patrón de distribución anual con una serie de cinco años (1977-1981).



Para el valor de evaporación total del embalse se tomó como referencia, la evaporación del Embalse de Ipizca, con un valor 1962 mm/año y la evaporación en el Jumeal de 2333 mm/año.

En resumen, para el cálculo de las pérdidas (evaporación + infiltración) en Motegasta se adoptó un valor intermedio entre los registros de Ipizca y Jumeal de 2150 mm/año, distribuido anualmente mediante el patrón de la estación Bella Vista, el cual fue el insumo para el modelo IPHII-Men.

- Determinación de los caudales aportados por el río Motegasta

Para las determinaciones de los caudales aportados, se utilizó un modelo de paso diario en una hoja de cálculo en el cual se aplica la expresión enunciada de balance hídrico.

En un primer momento, los cálculos se efectuaron con una pérdida por evaporación de 1088 mm/año, valor de la Estación Bella Vista. Los primeros resultados verificaban una cantidad relativamente importante de valores de caudales negativos. Estos valores negativos fueron verificados tanto en los caudales diarios como en los mensuales y, en algunos casos, anuales.

Los valores negativos diarios son el reflejo de la unidad de lectura, ya que un descenso de 1 centímetro corresponde a una disminución de volumen relativamente importante que se produce en un lapso de tiempo mayor y, por lo tanto, el resultado es falsamente un valor negativo.

Cuando el valor negativo corresponde a un caudal medio mensual o medio anual, seguramente el error cometido está en no considerar correctamente las pérdidas o las descargas. Como estas últimas son el resultado de un registro, queda como única variable de ajuste, las pérdidas por evaporación, por lo cual se asumió una evaporación anual de 2150 mm/año correspondiente a un valor intermedio a los registrados en las estaciones Ipizca y Jumeal ubicadas próximas al área del proyecto. De esta manera, se logró corregir los resultados negativos de aportes que no tienen significación física más que pérdidas no consideradas. Los valores de los caudales medios mensuales obtenidos mediante balance hídrico en el río Motegasta son presentados en la Tabla 2.



**Tabla 2**

Caudales generados por balance hídrico, cuenca río Motegasca

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1983	1.70	2.03	1.10	1.59	1.06	0.28	0.22	0.14	0.14	0.08	0.20	0.09
1984	0.29	0.14	2.22	2.25	0.50	0.39	0.41	0.25	0.23	0.13	0.09	0.06
1985	0.24	5.11	1.89	0.42	0.38	0.32	0.21	0.14	0.13	0.09	3.29	2.79
1986	0.52	0.83	0.61	1.89	0.23	0.08	0.10	0.65	0.14	0.15	0.15	0.12
1987	0.19	0.12	0.11	0.14	0.06	0.06	0.08	0.08	0.07	0.03	0.23	0.17
1988	0.30	0.11	0.18	0.07	0.07	0.07	0.04	0.04	0.04	0.01	0.01	0.01
1989	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.04	0.04	0.03	0.01	0.05	0.01	0.03
1990	0.21	0.61	1.73	0.83	0.59	0.34	0.35	0.17	0.10	0.12	0.10	0.11
1991	0.12	0.02	0.21	0.13	0.07	0.05	0.07	0.08	0.07	0.00	0.01	0.09
1992	0.58	7.47	0.40	11.48	2.78	0.39	0.40	0.29	0.23	0.10	0.16	0.40
1993	1.57	0.76	0.47	0.25	0.17	0.04	0.07	0.09	0.08	0.05	0.00	0.00
1994	0.05	0.19	0.14	0.10	0.10	0.06	0.05	0.07	0.06	0.18	0.18	0.03
1995	0.01	0.06	0.11	0.05	0.04	0.03	0.05	0.04	0.04	0.01	0.14	0.01
1996	0.10	0.05	0.06	0.06	0.33	0.10	0.08	0.07	0.08	0.08	0.07	0.01
1997	1.12	0.25	0.15	0.07	0.08	0.05	0.04	0.07	0.06	0.00	0.05	0.03
1998	1.09	0.92	1.20	0.88	0.61	0.41	0.32	0.28	0.16	0.14	0.14	0.13
1999	0.20	0.18	2.15	3.64	2.84	2.05	1.13	0.44	0.27	3.99	7.41	1.39
2000	1.64	1.49	16.82	2.91	1.51	0.48	0.40	0.28	0.16	0.17	0.31	0.81
2001	0.22	0.75	0.45	2.23	3.08	0.89	0.44	0.42	0.62	1.00	0.62	0.58
2002	0.81	1.02	0.98	0.60	0.45	0.35	0.23	0.12	0.13	0.16	0.12	0.19
2003	0.19	0.14	0.15	0.15	0.10	0.10	0.09	0.12	0.12	0.05	0.00	0.03
2004	0.00	0.00	0.05	0.15	0.02	0.08	0.07	0.04	0.01	0.00	0.04	0.18

Ajuste y verificación del modelo IPHII-MEN

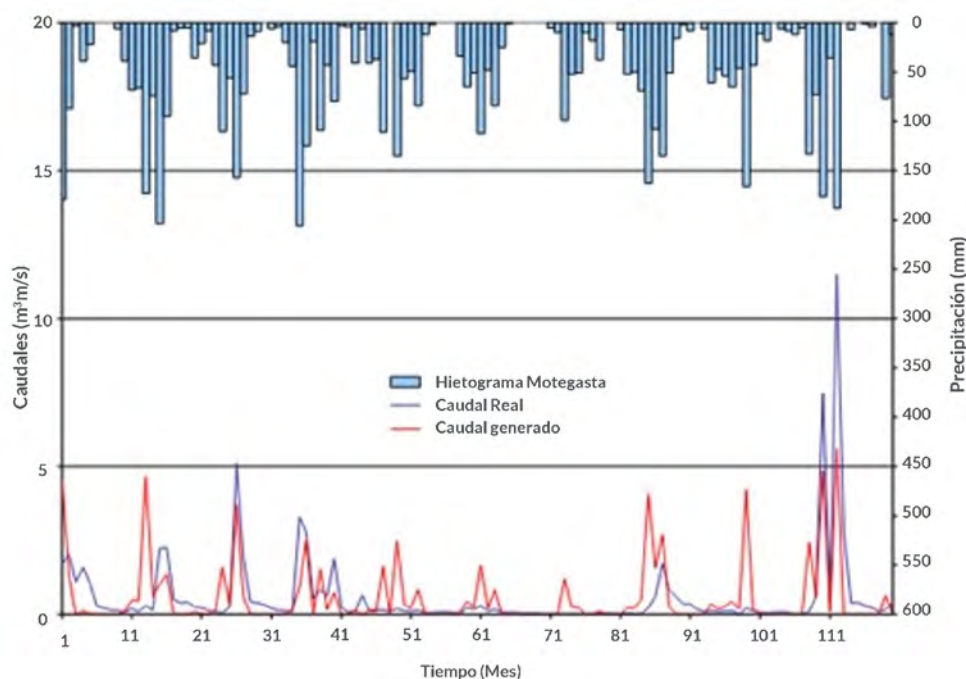
Con la precipitación de la estación Motegasta, la evaporación anual distribuida mensualmente y los caudales obtenidos por balance hídrico en la misma cuenca, se procedió a realizar el ajuste y la verificación del modelo. Para ello se utilizó la metodología descrita anteriormente.

Los valores de los parámetros obtenidos mediante dicho ajuste fueron: $a = 200$; $b = -0.85$; $c = 0.01$; $K_s = 0.01$; $K_{subt} = 0.1$; $Cr = 0.4$; " $\alpha=8$ y el coeficiente de correlación" (R^2) entre la serie real utilizada para el ajuste y la generada mediante los parámetros ajustados fue de, 0.95.

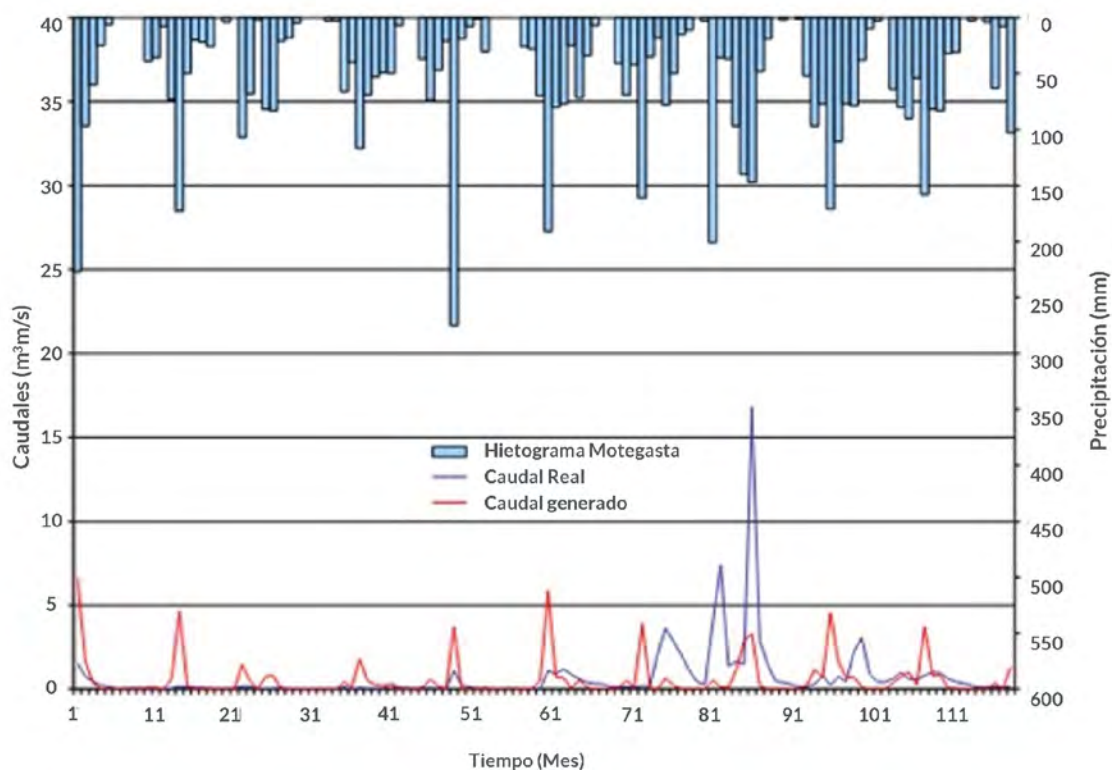
Posterior al ajuste, se procedió a la verificación del modelo; para ello se comparó los caudales generados por este, con los caudales obtenidos por balance hídrico correspondiente a un nuevo periodo de la serie, obteniendo un coeficiente de correlación relativo (R^2) de 0.87. Los resultados son representados en la Figura 4.

**Figura 4**

Ajuste Modelo de Transformación Lluvia-Caudal IPHII Men - Cuenca río Motegasta

**Figura 5**

Verificación Modelo de Transformación Lluvia-Caudal IPHII Men Cuenca río Motegasta





La generación de precipitaciones fue realizada por medio del modelo empírico estocástico de Thomas Fiering, el cual fue previamente verificado mediante la comparación de valores calculados y observados, obteniendo coeficientes de correlación de 0.7 y 0.6 para las series de las estaciones Motegasta y El Alto, respectivamente. Entre las razones más relevantes que influyeron en estos resultados estuvieron: la corta extensión de las series utilizadas como base en la generación y, la débil relación de información mes a mes, especialmente para los registros de la estación El Alto. A pesar de que los coeficientes de correlación del proceso de verificación no brindaron una mayor confiabilidad en la generación, su estructura puede considerarse aceptable a los fines y condiciones del trabajo, resultados que concuerdan con estudios similares como los de Moraes y Pinho (2000); Upper Colorado River Commission y Morris E. Garnsey (1961); Julian (1961); y Herrera-Quispe (2013).

Con relación al ajuste y verificación del modelo de transformación lluvia-caudal IPHII Men, los coeficientes de correlación relativos (ponderados con relación a los caudales observados) fueron de 0.95 y 0.87, respectivamente, mostrando un razonable grado de correspondencia entre los datos calculados y los datos observados, lo cual se puede contrarrestar en trabajos similares como el de Alonso y Bertoni (2007) y Ganancias y Fontana (2004, citados por Alonso y Bertoni, 2007).

Conclusiones

Los modelos matemáticos empleados para la estimación de caudales medios mensuales fueron simples y apropiados, en función de la cantidad y calidad de la información disponible, así como también, de los fines requeridos. La disminución de la incertidumbre que encierra a las estimaciones realizadas solo podrá ser disminuida de manera considerable, con base en una mayor disponibilidad de datos.

Los modelos matemáticos empleados dentro de la metodología de estimación de caudales medios mensuales fueron oportunos, puesto que permitieron realizar aproximaciones razonables en las diferentes estimaciones, las cuales son necesarias cuando no hay disponibilidad de información de campo adecuada para la cuantificación de las diferentes variables hidrológicas.

La generación de precipitaciones fue realizada por medio del modelo estocástico de Thomas Fiering, el cual fue previamente verificado mediante la comparación de valores calculados y observados, obteniendo coeficientes de correlación de 0.7 y 0.6 para las series de las estaciones Motegasta y El Alto, respectivamente. Entre las razones más relevantes que influyeron en estos resultados están: la corta extensión de las series utilizadas como base en la generación y, la débil relación de información mes a mes, especialmente para los registros de la estación El Alto.

Con relación al ajuste y verificación del modelo de transformación lluvia-caudal IPH-IImen, los coeficientes de correlación relativos encontrados fueron de 0.95 y



0.87 respectivamente, mostrando un adecuado grado de correspondencia entre los datos calculados y los datos observados, siendo lógico de esperar, una diferencia entre uno y otro, pues el primero compara la serie calculada con la utilizada, para ajustar los diferentes parámetros, mientras que el otro es relacionado, teniendo en cuenta un nuevo periodo de la serie utilizada.

Referencias

- Alonso, F. J. y Bertoni, J. C. (2007). Calibración automática del modelo hidrológico IPH-II en dos cuencas típicas argentinas. <https://acortar.link/OnIDrI>
- Carvajal, Y., Arango, D. y Jiménez, H. (2007). *Estimación de caudales promedios mensuales por subcuencas hidrológicas mediante modelación con HEC-HMS*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Clarke, R. (1973). *Mathematical models in hydrology*. Institute of Hydrology Wallingford.
- Crawford, H. H. y Linsley, R. K. (1966). Digital simulation in Hydrology: Stanford Watershed Model IV. Technical Report No. 39. [https://www.scirp.org/\(S\(lz5mqp453edsnp55rrgjct55\)\)/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1477339](https://www.scirp.org/(S(lz5mqp453edsnp55rrgjct55))/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1477339)
- Herrera-Quispe, J. A. (2013). *Modelo Estocástico a partir de Razonamiento Basado en Casos para la Generación de Series Temporales* [Tesis doctoral, Universidad Nacional de San Agustín]. <https://repositorio.concytec.gob.pe/handle/20.500.12390/346>
- Julian, P. R. (1961). *Study of the statistical predictability of stream-runoff in the upper Colorado River Basin A*. University of Colorado.
- Moraes, R. y Pinho, S. (2000). Thomas-Fiering hydrologic model to the management of two experimental drainage basins [1997]. *Energia na Agricultura*, 12(1), 5-12.
- Roldán, E. (2009). *Reconstrucción histórica de los caudales mensuales a lo largo de la red de drenaje de Colombia*. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.
- Tucci, C. E. (1998). *Modelos Hidrológicos*. Asociación Brasileña de Recursos Hídricos.
- Upper Colorado River Commission & Garnsey, M. E. (1961). *Past and Probable Future Variations in Stream Flow in the Upper Colorado River: Probability analysis applied to the development of synthetic hydrology for the Colorado River*, M.R. Brittan. Bureau of Economic Research, University of Colorado.

