

COMPARACIÓN DE MODELOS HIDROLÓGICOS PARA LA SIMULACIÓN DE CAUDALES MEDIOS MENSUALES EN LA CUENCA DEL RÍO TOMAYAPO

COMPARISON OF HYDROLOGICAL MODELS TO SIMULATION OF MONTHLY AVERAGE FLOW IN THE BASIN OF THE TOMAYAPO RIVER

Ricaldi Torrez Oscar¹

¹ Ingeniero Civil – Docente Departamento de Obras Hidráulicas y Sanitarias- Carrera de Ing. Civil, Facultad de Ciencias y Tecnología – Universidad Autónoma “Juan Misael Saracho”

Correo electrónico: ricaldi_oscar@yahoo.com.ar

RESUMEN

En el diseño de obras hidráulicas se requiere saber con cierta seguridad la cantidad de agua que pasara en un río en un determinado tiempo, esto se puede solucionar mediante la medición periódica de los caudales que pasan por un periodo suficientemente largo en el que se tome en cuenta periodos de sequía y periodos de mucha lluvia; la cantidad de ríos es numerosa, además se necesita personal, equipo y herramientas de medición para aforar caudales todos los días; estas condiciones no se cumplen en nuestro medio por falta de recursos económicos y poco apoyo de las autoridades de turno; por lo que se recurre al cálculo de caudales mediante ecuaciones matemáticas que reproducen los fenómenos hidrológicos, específicamente mediante la relación que existe entre la precipitación y la escorrentía; pero para la aplicación correcta de estas ecuaciones matemáticas denominado modelos hidrológicos de precipitación escorrentía es necesario conocer, o sea calibrar sus parámetros o coeficientes que dependen de las características particulares de cada cuenca hidrológica.

De los pocos métodos conocidos en nuestro medio para generar caudales medios mensuales tiene más uso el modelo tradicional que hace uso del coeficiente “c” de escorrentía que separa la parte de la precipitación total que se convierte en escorrentía directa. En las últimas décadas se hacen cada vez más populares los modelos hidrológicos matemáticos; este tipo de modelos simplifican los fenómenos hidrológicos de manera que se puedan representar en ecuaciones matemáticas que además de simular la escorrentía también ofrecen datos de evaporación, evapotranspiración, infiltración y escurrimiento subterráneo.

El desconocimiento de los valores de los parámetros de estos modelos para poder ser aplicados en la simulación de caudales medios mensuales con cierta confiabilidad es una causa de la no aplicación en nuestro medio; en el presente trabajo se pretende solucionar este problema proponiendo una metodología para la calibración de estos parámetros, para los cuales se dispone de caudales aforados. Además de la validación y comparación entre modelos se emitirán recomendación para su uso.

En el presente trabajo se compara el modelo que utiliza el coeficiente “c” de escorrentía con los Modelos TEMEZ y THOMAS, estos requieren como principal dato de entrada la precipitación y la evapotranspiración potencial, utilizan parámetros o coeficientes que representan las características propias de la cuenca que interviene en la transformación de la precipitación en escorrentía; los parámetros de este tipo de modelos deben ser calibrados mediante el contraste entre caudales simulados por el modelo con caudales aforados correspondientes a un mismo periodo de estudio; una vez calibrados los parámetros del modelo y si existe una buena correlación o semejanza entre caudales simulados y observados se pueden emplear para generar series históricas de caudales medios mensuales que servirán en el diseño de obras hidráulicas.

Palabras clave: cuenca hidrográfica, infiltración, escurrimiento, modelos, calibración

ABSTRACT

In the design of hydraulic works is required to know with some certainty the amount of water that happen in a river at a certain time, this can be solved by measuring periodic flows that pass for

a period long enough in which take into account periods of drought and periods of high rainfall; the number of rivers is numerous, also needed personnel, equipment and measurement tools for total flow every day. These conditions are not met in our midst because of lack of economic resources and little support from the authorities of the day; so it is used to calculate flow rates using mathematical equations that reproduce hydrological phenomena, specifically by the relationship between precipitation and runoff; but for the correct application of these mathematical equations known as hydrological models of rainfall runoff is necessary to know, or to calibrate its parameters or coefficients.

Of the few known methods in our midst to generate monthly average flow has more use the traditional model that makes use of the "c" coefficient of runoff that separates the part of the total precipitation that develops in direct runoff. In recent decades are increasingly popular made mathematical hydrological models; This type of models simplify hydrological phenomena so that they can represent in mathematical equations that also simulate the runoff also offer data of evaporation, evapotranspiration, infiltration and underground runoff.

On the ignorance of the values of these model parameters, to be applied in the simulation of flow media monthly with some reliability, it is a cause for not application in our regions. The present work intends to solve this problem by proposing a methodology for the calibration of these parameters, for which volumetric flow rates are available. Recommendation for use shall be issued in addition to the validation and comparison of models.

This paper compares the model that uses the runoff coefficient "c" with the TÉMEZ and THOMAS models, these require as main data input precipitation and potential evapotranspiration, use parameters or coefficients which represent the characteristics of the basin which is involved in the transformation of rainfall into runoff. The parameters of this type of models should be calibrated using the contrast between simulated flow by the model with volumetric flow rate corresponding to a period of study; Once calibrated the parameters of the model and if there is a good correlation or similarity between simulated and observed flows can be used to generate historical series of monthly media flow that will be used in the design of hydraulic works.

Key words: River basin, infiltration, runoff, models, calibration

OBJETIVO GENERAL

Ajustar y comparar los Modelos Hidrológicos de Transformación Precipitación – Escorrentía mediante la calibración de sus parámetros para su aplicación en la estimación de caudales medios mensuales en la Cuenca del Rio Tomayapo tomando como el punto de control la estación hidrométrica ubicada en la comunidad El Molino.

ALCANCE

1ra. Etapa.- Se calibran los coeficientes y parámetros de los modelos hidrológicos aplicados en la cuenca del Rio Tomayapo (provincia Méndez del Departamento de Tarija). En el proceso de calibración/validación se utilizaron 6 periodos continuos de medición de lluvias y caudales a escala mensual (1981 -1987).

2da Etapa.- Se realizó un análisis de validación de los parámetros y coeficientes.

3ra. Etapa.- se realizó la comparación analítica de los resultados de los modelos

DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS.-

Coefficiente "c" de escorrentía.

Es el mas simple y por lo tanto el más usado. Necesita datos de precipitación y conocer el coeficiente de escorrentía. Indica qué porcentaje de la precipitación P se convierte en escorrentía superficial S.

$$C_e = S/P$$

$$S = C P$$

El coeficiente "c" permite inferir el grado de influencia sobre el escurrimiento superficial de distintas variables como: suelo, vegetación y pendiente de la cuenca.

El modelo Téméz

Creado en 1977, modificado y ajustado en varios estudios está siendo muy usado en zonas de España con buenos resultados, en los últimos años su uso también se ha extendido a Chile y otros países de Sud América y puede ser una alternativa más de solución al problema identificado y puede ser comparado con otros métodos usados en nuestro medio.

Este modelo supone dividir el perfil del suelo en una zona superior insaturada, y otra inferior que se halla completamente saturada, asemejando

su comportamiento a un embalse subterráneo que desagua en la red superficial. El modelo contempla el ajuste de 4 parámetros:

- **Hmax:** Capacidad máxima de almacenamiento del suelo (mm)
- **C:** Parámetro de excedente (adimensional)
- **Imáx:** Capacidad máxima de infiltración
- **A:** Coeficiente de recesión del acuífero (1/día)

Con datos de entrada de precipitación y evapotranspiración simula todos los términos del ciclo hidrológico. La aportación total se calcula como la aportación superficial más la aportación subterránea.

El modelo Thomas

Fue desarrollado en 1981, el cual se conoce también como modelo "abcd". Este modelo hídrico de carácter agregado establece mediante la determinación de cuatro (4) parámetros del caudal afluente en una cuenca. Por la simplicidad de sus ecuaciones y poco requerimiento de información, este modelo es usualmente utilizado con fines académicos, lo cual no le quita validez y puede utilizarse para estudiar cuencas pequeñas (Salas et al., 1981).

Para la explicación del modelo Thomas se debe tener en claro que el suelo está dividido en tres (3) zonas. Una primera parte que es donde se presenta todo lo relacionado al almacenamiento superficial y es representado como S_c . Para la segunda zona que es la no saturada S_w , se puede asimilar la recarga que experimenta el acuífero R_g a la infiltración, debido a que el caudal subsuperficial Q_s es despreciado por el modelo por ser en comparación con la precipitación, muy pequeño.

La última zona que es la zona saturada presenta un almacenamiento S_g .

En este modelo los parámetros a , b , c y d describen lo siguiente:

Parámetro a: Expresa la tendencia ante la presencia de un suelo que se encuentre completamente saturado y que la escorrentía ocurra,

Parámetro b: Representa el límite superior a la suma de la evapotranspiración real y a la humedad.

Parámetro c: Hace referencia a esa fracción que se encuentra en el almacenamiento subterráneo que se incluye en la escorrentía, aunque no siempre se relaciona a esta fracción debido a

que no siempre toda la carga se convierte en escorrentía superficial durante el intervalo de tiempo que se considere.

Parámetro d: Es el recíproco del tiempo de resistencia del agua subterránea, pero teniendo en cuenta que en ese tiempo puede relacionarse con todo el acuífero, con la porción de esto más cercano al río, o simplemente con recorridos superficiales más rápidos.

El modelo "abcd" es un modelo conceptual de precipitación escorrentía, basado en el balance de agua de una cuenca (Salas, 2002). El modelo utiliza la precipitación como dato de ingreso y todas las demás variables son calculadas como porcentajes de la precipitación.

Finalmente, el caudal es estimado como la suma de la escorrentía superficial y el flujo base:

UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LAS CUENCAS EN ESTUDIO

Geográficamente la cuenca de aporte se ubica en las comunidades de El Molino, Iscayachi, Campanario, y otras pertenecientes a la Provincia Méndez del Departamento de Tarija.

El punto de estudio para la calibración de los modelos corresponde al punto de aforo ubicado en la estación Hidrometeorológica: El Molino - Tomayapo, ubicado en las siguientes coordenadas:

Lat. S.: 21° 22'30"
Long. W.: 64° 57'27"
Altura: 3200 msnm.

DATOS CON LO QUE SE DISPONE:

PRECIPITACIONES

Se emplearán los datos de las estaciones del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) más cercanas al lugar de estudio. Las precipitaciones a emplear en la calibración corresponden al promedio de las estaciones de Sama Cumbre y Sama Iscayachi porque concuerdan con el mismo periodo de observación de los caudales. Todos estos datos se encuentran a disposición del público en el portal del SENAMHI.

CAUDALES MEDIOS

Los datos de caudales aforados fueron medidos en la estación Hidrométrica El Molino - Tomayapo, corresponden a los periodos 1978 al 1988. Los datos

con que se cuentan son caudales medios diarios. A partir de estos se determinaron los caudales

medios mensuales. Este dato es indispensable para la calibración y validación de los modelos.

Tabla 1: Caudales medios mensuales (m³/seg)

Estación: EL MOLINO
Provincia: MENDEZ
Departamento: TARIJA

Lat. S.: 21° 22'
Long. W.: 64° 57'
Altura: 3.200 m.s.n.m.

| CAUDALES MEDIOS MENSUALES (m3/s) | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Año | OCT | NOV | DIC | ENE | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEP | MEDIA |
| 1978-1979 | 0,159 | 0,039 | 1,756 | 4,787 | 4,290 | 1,911 | 1,147 | 0,438 | 0,276 | 0,142 | 0,039 | 0,008 | 1,25 |
| 1979-1980 | 0,006 | 0,007 | 0,733 | 1,243 | 1,940 | 3,728 | 1,089 | 0,397 | 0,218 | 0,076 | 0,011 | 0,006 | 0,79 |
| 1980-1981 | 0,005 | 0,003 | 0,002 | 0,850 | 5,411 | 3,059 | 0,966 | 0,352 | 0,206 | 0,069 | 0,012 | 0,009 | 0,91 |
| 1981-1982 | 0,011 | 0,021 | 0,160 | 1,028 | 1,118 | 3,008 | 0,675 | 0,322 | 0,167 | 0,035 | 0,005 | 0,005 | 0,55 |
| 1982-1983 | 0,006 | 0,005 | 0,039 | 0,016 | 0,010 | 0,003 | 0,011 | 0,032 | 0,013 | 0,007 | 0,010 | 0,004 | 0,01 |
| 1983-1984 | 0,002 | 0,001 | 0,013 | 7,040 | 9,238 | 8,285 | 2,449 | 0,218 | 0,052 | 0,020 | 0,019 | 0,007 | 2,28 |
| 1984-1985 | 0,007 | 0,074 | 0,470 | 0,061 | 9,537 | 3,787 | 1,098 | 0,810 | 0,637 | 0,160 | 0,029 | 0,011 | 1,39 |
| 1985-1986 | 0,012 | 5,152 | 9,703 | 9,045 | 4,582 | 6,124 | 1,356 | 0,677 | 0,274 | 0,094 | 0,027 | 0,017 | 3,09 |
| 1986-1987 | 0,021 | 0,045 | 2,487 | 0,888 | 0,570 | 0,397 | 0,297 | 0,277 | 0,250 | 0,185 | 0,147 | 0,117 | 0,47 |
| 1987-1988 | 0,125 | 0,145 | 0,165 | 1,456 | 0,665 | 12,876 | 5,846 | 0,256 | 0,056 | 0,037 | 0,012 | 0,005 | 1,80 |
| MEDIA | 0,04 | 0,55 | 1,55 | 2,64 | 3,74 | 4,32 | 1,49 | 0,38 | 0,21 | 0,08 | 0,03 | 0,02 | 1,25 |

CALIBRACIÓN DE MODELOS

Para la calibración de los modelos se elaboraron planillas en Excel donde los valores dependientes varían automáticamente con el cambio de valores de los parámetros de cada modelo

La metodología de calibración es manual: "prueba – error". Se hacen variar los parámetros del modelo buscando que los caudales simulados sean iguales o parecidos a los caudales aforados.

Para la calibración de los modelos se utilizaron datos

consecutivos de 6 periodos de observaciones de caudales medios mensuales (1981 hasta 1987).

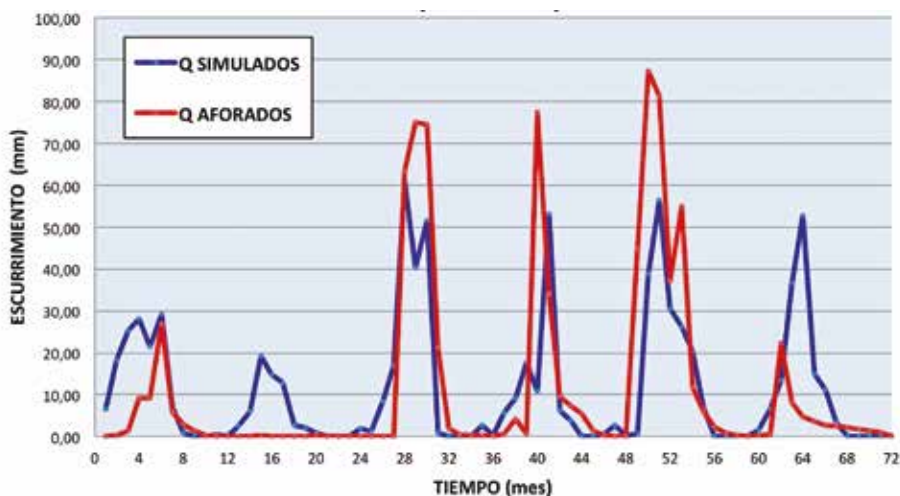
Calibración del coeficiente "c" de escorrentía

Del proceso de calibración resulta el valor del coeficiente de escorrentía:

C = 0.214

La forma del hidrograma simulado se asemeja al hidrograma de caudales aforados.

Figura 1: Coeficiente "C" de escorrentia hidrograma de caudales sumulados vs. caudales aforados (1981 - 1987)



Calibración del modelo Témez

Del proceso de calibración se obtiene los siguientes parámetros del modelo Témez para generar caudales medios mensuales.

Tabla 2:

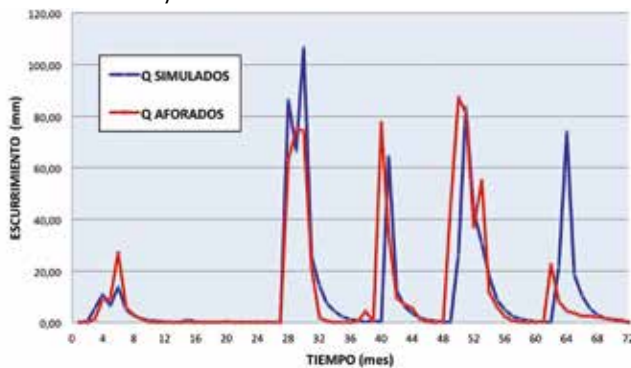
| PARAMETRO | SIMBOLO | UNIDAD | VALOR CALIBRADO |
|---|---------|--------------|-----------------|
| Capacidad máxima de almacenamiento de humedad del suelo | Hmax | mm. | 127 |
| Capacidad máxima de infiltración | Imax | mm. | 190 |
| Parámetro de excedente | C | adimensional | 0.57 |
| Coefficiente de recesión del acuífero | a | 1/día | +0.02 |

Además se obtuvieron los valores iniciales de:

Tabla 3:

| VARIABLES DEL MODELO | SIMBOLO | UNIDAD | VALOR RECOMENDADO |
|---------------------------------------|---------|--------|-------------------|
| Humedad inicial en el suelo | (H0) | mm. | 0,0 |
| Almacenamiento inicial en el acuífero | (V0) | mm. | 0,3 |

Figura 2: Modelo Temez, hidrograma de caudales simulados vs. caudales aforados (1981 - 1987)



CALIBRACION DEL MODELO "abcd" THOMAS

Los parámetros resultantes de la calibración del modelo Thomas son los siguientes:

Tabla 4:

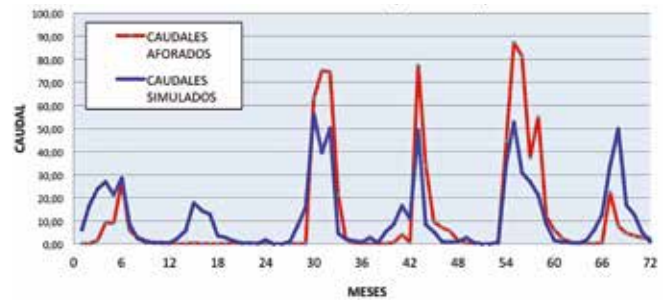
| PARAMETRO | VALOR CALIBRADO |
|-----------|-----------------|
| a | 0.194 |
| b | 0.974 |
| c | 0.415 |
| d | 0.022 |

Además se puede usar los valores iniciales de:

Tabla 5:

| VARIABLES DEL MODELO | SIMBOLO | UNIDAD | VALOR RECOMENDADO |
|------------------------------------|---------|--------|-------------------|
| Almacenamiento subterráneo inicial | (GS0) | mm. | 0.25 |

Figura 3: Modelo Thomas, hidrograma de caudales simulados vs. caudales aforados (1981 - 1987)



VALIDACION DE LOS MODELOS

La validación de cada modelo se lo realizara mediante la comparación entre caudales simulados con los caudales aforados para los mismos periodos.

Medios para la validación:

- a) **Contrastación visual de hidrogramas:** el hidrograma de caudales simulados debe parecerse al hidrograma de caudales aforados para poder validar el modelo.
- b) **Índices de error:** si el error es pequeño indicara que hay poca diferencia entre pares de puntos simulados y aforados.
- c) **Coefficiente de correlación:** El coeficiente de correlación debe ser lo más cercano a uno para validar el modelo

VALIDACION DEL MODELO QUE USA EL COEFIENTE DE ECORRENTIA "C"

- a) **Contrastación visual de hidrogramas:** El ajuste visual es relativamente aceptable, en 4 periodos los picos coinciden, en el último periodo la diferencia entre los picos es notoria, pero la diferencia más marcada se ve en el segundo periodo donde aparece un pico que no refleja el hidrograma de datos aforados. Esto demuestra que este método no simula con precisión la escurrimienta que se produce en años con poca precipitación y tiende a exagerar el escurrimiento.

- b) **Calculo de errores:**

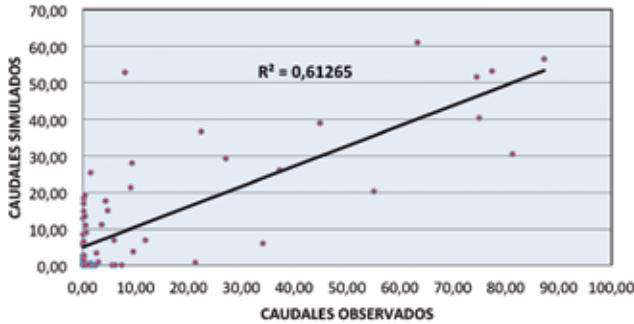
Tabla 6:

| FACTOR DE ERROR | MODELO DEL COEFIENTE "C" |
|-------------------------------|--------------------------|
| ERROR RELATIVO MEDIO | -0.0004 |
| ERROR CUADRATICO MEDIO (RMSE) | 16 |
| ERROR ABSOLUTO MEDIO (MAE) | 9 |
| ERROR ABSOLUTO MEDIO (NMAE) | 28.11 |
| ERROR ABSOLUTO MEDIO (BLAS) | -0.004 |

Los valores de los errores calculados del contraste entre valores simulados y observados son bajos lo que indica una aceptable capacidad de este método para simular caudales medios mensuales, teniendo cierta prudencia en años secos.

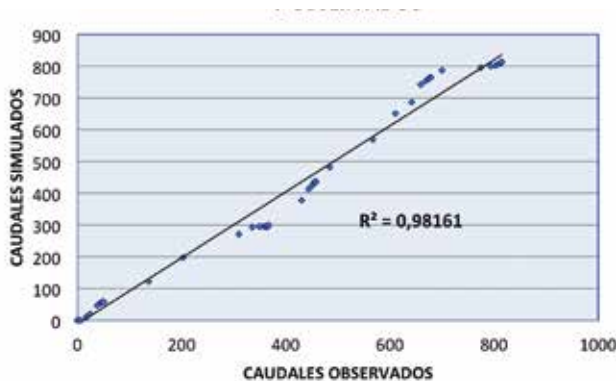
c) Coeficiente de correlación:

Figura 4: "C": Contraste entre caudales simulados y observados



El coeficiente de correlación no es el ideal, indica que debe usarse el método con prudencia.

Figura 5: "C": Contraste entre caudales simulados y observados



Los puntos no se aleja de la curva doble acumulada lo que indica semejanza aceptable entre valores simulados y observados, el coeficiente es alto lo que valida el modelo.

VALIDACION DEL MODELO TEMEZ

a) Contrastación visual de hidrogramas:

El ajuste visual es buenísimo, los picos coinciden en los meses lluviosos y las recesiones coinciden en ambos hidrogramas en los meses en que no llueve, el segundo periodo que es muy seco presenta baja escorrentía en ambos hidrogramas lo que demuestra un alta capacidad del modelo Téméz de representar con veracidad el proceso de transformación: precipitación – escorrentía.

b) Calculo de errores:

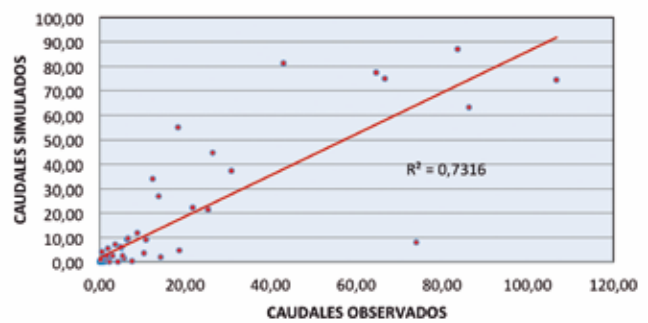
Tabla 7:

| FACTOR DE ERROR | MODELO TEMEZ |
|-----------------------------------|--------------|
| ERROR RELATIVO MEDIO | 0,0004 |
| ERROR CUADRATICO MEDIO (RMSE) | 17 |
| ERROR ABSOLUTO MEDIO (MAE) | 7 |
| ERROR ABSOLUTO MEDIO (NMAE) | 2,41 |
| ERROR ABSOLUTO MEDIO (BLAS) | 0,005 |
| COEFI. DE CORRELACION | 0.73 |
| COEFI. DE CORRELACION (acumulada) | 0.98 |

Los valores de los errores calculados del contraste entre valores simulados y observados son bajos lo que indica una aceptable capacidad del modelo Téméz para predecir caudales medios mensuales.

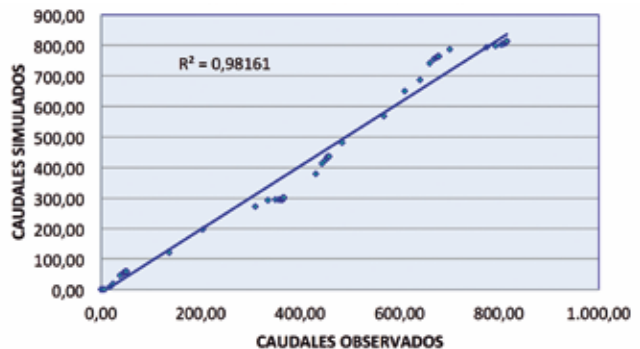
c) Coeficiente de correlación:

Figura 6: Temez: contraste entre caudales simulados y observados



El coeficiente de correlación es aceptable hay semejanza entre valores simulados y observados, aunque no son iguales.

Figura 7: Temez, curva doble acumulada de caudales simulados y observados



Los puntos no se aleja de la curva doble acumulada lo que indica semejanza entre valores simulados y observados, el coeficiente es alto lo que valida aún más el modelo.

VALIDACION DEL MODELO “abcd” THOMAS

a) Contrastación visual de hidrogramas:

Visualmente se puede ver que existe cierta similitud en 5 periodos, pero no así en el segundo periodo donde el modelo “abcd” Thomas genera un pico que difiere de los caudales aforados. Pese a esto el ajuste es aceptable.

b) Calculo de errores:

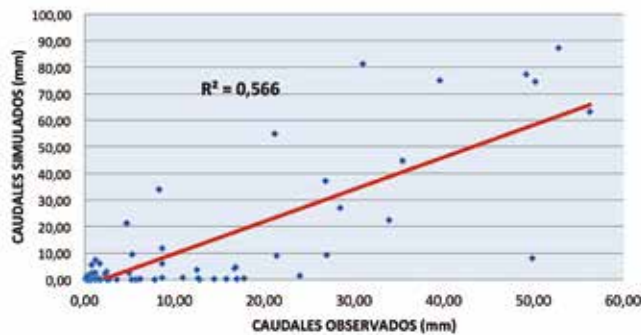
Tabla 8:

| FACTOR DE ERROR | MODELO ABCD THOMAS |
|-----------------------------------|--------------------|
| ERROR RELATIVO MEDIO | 0,0001 |
| ERROR CUADRATICO MEDIO (RMSE) | 14 |
| ERROR ABSOLUTO MEDIO (MAE) | 9 |
| ERROR ABSOLUTO MEDIO (NMAE) | 28,94 |
| ERROR ABSOLUTO MEDIO (BLAS) | 0,001 |
| COEFI. DE CORRELACION | 0,57 |
| COEFI. DE CORRELACION (acumulada) | 0,97 |

Los valores de los errores calculados del contraste entre valores simulados y observados son bajos lo que indica una aceptable capacidad del modelo Thomas para predecir caudales medios mensuales.

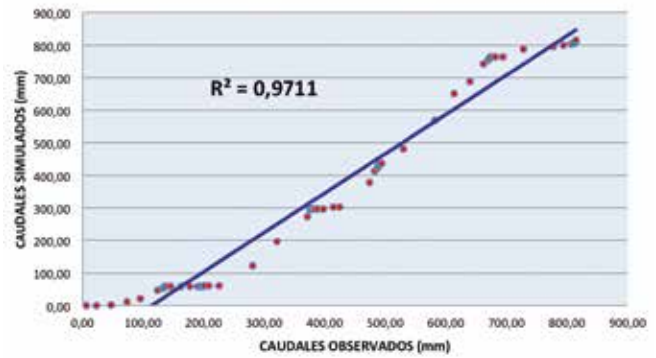
c) Coeficientes de correlación:

Figura 8: Thomas: Contraste entre caudales simulados y observados



El coeficiente indica baja correlación, hay diferencias notables en algunos pares de puntos, los caudales simulados en algunos casos no se parecen a los observados.

Figura 9: Thomas: Curva doble acumulada de caudales simulados y observados



Cuando se acumula los valores la correlación es muy aceptable, analizando todo el periodo de 6 años la diferencias son menores y los valores simulados en la mayor parte del periodo se asemejan a los observados.

DISCUSIÓN

COMPARACION DE DATOS DE ENTRADA

Para el primer método del coeficiente de escorrentía solo se requiere datos de precipitaciones. Para los modelos Témez y Thomas los datos de entrada son las alturas de precipitación mensuales y temperaturas medias para determinar la evapotranspiración potencial; no se tuvo mayores problemas ya que el SENAMHI cuenta con esta información, en la zona de estudio se dispone de 3 estaciones pluviométricas y una estación climatológica.

COMPARACION DE ERRORES DE LA CALIBRACIÓN

Tabla 9: Cuadro comparativo

| FACTOR DE ERROR | MODELO TEMEZ | MODELO ABCD THOMAS | MODELO DEL COEFICIENTE DE ESCORRENTIA |
|-----------------------------------|--------------|--------------------|---------------------------------------|
| ERROR RELATIVO MEDIO | -0,0004 | 0,0001 | -0,0004 |
| ERROR CUADRATICO MEDIO (RMSE) | 17 | 14 | 16 |
| ERROR ABSOLUTO MEDIO (MAE) | 7 | 9 | 9 |
| ERROR ABSOLUTO MEDIO (NMAE) | 2,41 | 28,94 | 28,11 |
| ERROR ABSOLUTO MEDIO (BLAS) | 0,005 | 0,001 | -0,004 |
| COEFI. DE CORRELACION | 0,73 | 0,57 | 0,61 |
| COEFI. DE CORRELACION (acumulada) | 0,98 | 0,97 | 0,98 |

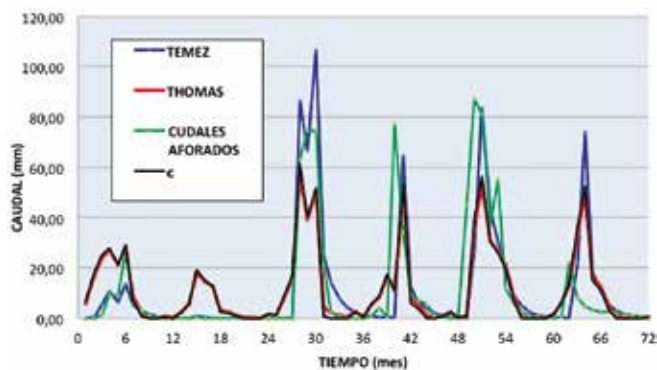
Todos los coeficientes arrojan valores bajos, lo que demuestra un buen ajuste de los tres modelos, de la comparación más exhaustiva se denota que el Modelo Témez lleva la ventaja porque en el ERROR ABSOLUTO MEDIO (NMAE) (promedio de los valores absolutos de la diferencias entre valores simulados y observados) presenta un valor más bajo, los coeficientes de correlación entre valores simulados y valores aforados confirman

que el modelo Témez reproduce resultados más próximos a los reales; esto se da a razón de que en el segundo periodo de calibración los otros dos modelos hacen aparecer un pico de caudal que no representan los caudales aforados mientras que Témez tiene menos diferencia con los valores aforados (observados).

COMPARACION APORTACION TOTAL (escurrimiento)

Para realizar esta comparación se sobrepone los caudales simulados por los tres modelos con el Hidrograma de caudales aforados.

Figura 10: Comparación de hidrogramas



- La forma general de los Hidrogramas de datos simulados se asemeja al hidrograma de caudales aforados, presenta picos en los meses con lluvia y este se reduce bastante en los meses en que no llueve, esto también denota que los hidrogramas simulan el ciclo hidrológico a escala anual.
- Los tres modelos reproducen muy bien los caudales correspondientes a los meses del año en que no llueve.
- En los picos hay diferencias marcadas:
 - a) En el primer periodo el modelo del coeficiente "c" y Thomas coincide con los aforados, Témez se queda muy bajo.
 - b) En tres periodos consecutivos (3, 4 y 5) Témez se asemeja más a los aforados mientras que el coeficiente "c" y Thomas está por debajo.
 - c) En el último periodo los 3 modelos simulan caudales superiores a los aforados.

Estas diferencias indicadas en los incisos a, b y c en los caudales picos pueden atribuirse a los datos de entrada, principalmente a la precipitación; como sabemos las precipitaciones presentan variaciones reales y temporales; mientras más grande sea la cuenca la variación es mayor. Para tomar en cuenta esta variación en cualquier cálculo hidrológico se debe disponer de varias estaciones pluviométricas

y bien distribuidas en toda la cuenca. Esta última condición casi nunca se cumple por lo que se trabaja con las estaciones disponibles que no siempre representan con precisión la precipitación de toda una cuenca.

- El segundo periodo es el más interesante de analizar, la precipitación en ese año hidrológico es muy baja, esto se corrobora con otras estaciones de otras cuencas que también denotan un año seco. Como es de esperarse los caudales aforados también arrojan valores mínimos que indican un año seco. Témez coincide casi con exactitud con los caudales aforados, mientras que el modelo del coeficiente "c" y el modelo Thomas genera un pico que no existe en el hidrograma de caudales aforados. Esto se explica con el fundamento de que la poca precipitación existente se transforma en evapotranspiración, infiltración que recarga el acuífero dejando muy poco para el escurrimiento directo y subterráneo. El coeficiente "c" de escorrentía y Thomas minimiza estas pérdidas dando mayores valores de escurrimiento. Este aspecto indica que Témez reproduce mejor los caudales medios mensuales sin importar la variación de precipitación.

CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos se puede evidenciar que el modelo Témez se ajusta mejor a las condiciones hidrológicas de esta zona ya que los caudales simulados tienen mucha semejanza con los reales aforados tanto para años lluviosos como para años poco lluviosos; resulta muy aplicable para zonas con mucha variación pluviométrica.

Esto no quiere decir que los otros modelos no sean buenos, estos también mostraron buen ajuste, pero simula caudales sobreestimados en los periodos de poca precipitación lo que la hace menos aplicable para zonas con mucha variación pluviométrica.

El periodo de calibración es de 6 años lo que es muy representativo, durante este periodo se tiene caudales altos y bajos lo que representó un verdadero reto para los 3 modelos ya que tiene el poder de reproducir esa variedad de caudales con aceptable precisión.

Como puede observarse, los tres modelos muestran un importante ajuste al flujo base pero una importante deficiencia en la representación de flujos pico. Dependiendo del uso que se le dará al modelo, los parámetros de condiciones iniciales pueden ser ajustados de manera tal que se

pueda obtener un mejor ajuste del flujo base (en desmedro de los caudales pico) o de los caudales pico (con menor ajuste del flujo base). Por lo mismo el método no se debe aplicar a caudales máximos, solo para simular caudales medios.

Del análisis de los resultados obtenidos se concluye que los tres modelos tienen la capacidad de simular caudales medios mensuales con semejanza a los valores observados (aforados), no se puede negar que existe diferencias pero están dentro de un rango aceptable, por lo que se puede decir que son aplicables a nuestro medio, los parámetros obtenidos se puede utilizar para la generación de series de caudales medios mensuales a partir de sus precipitaciones medias mensuales correspondientes.

Como conclusión final podemos afirmar que los tres modelos son aplicables en nuestro medio tomando en cuenta las consideraciones resaltadas en el presente trabajo las cuales se resumen en los dos siguientes párrafos:

- Si solo interesa simular aportaciones totales (caudales medios mensuales) el modelo del coeficiente "c" de escorrentía y el modelo Thomas se puede usar solo teniendo en cuenta que la variación de la precipitación no sea muy elevada de periodo a periodo.
- Si además de aportaciones totales, interesa conocer valores de evapotranspiración, infiltración, aporte superficial, aporte subterráneo, y almacenamiento subterráneo se puede recurrir al Modelo Témez, el cual bien puede ser usado en balances hidrológico de cuencas sin la restricción de la variación pluviométrica.
- Los valores obtenidos como el de cualquier otro modelo son aproximaciones a la realidad que tiene un fundamento teórico y mediciones reales de algunas variables importantes que lo respaldan, de ninguna manera son valores 100% exactos, por eso deben ser usados con cautela previa evaluación de los resultados.

RECOMENDACIONES

- De entre los dos modelos se recomienda el uso del modelo Témez para la generación de caudales medios mensuales sin importar la variabilidad de la precipitación.
- Se recomienda el uso del Modelo "abcd" Thomas para la generación de caudales medios mensuales cuando la variación de la precipitación es mínima.
- Se recomienda el uso del Modelo Témez para realizar balances hidrológicos en cuencas.

- Se debe promover la calibración de los 3 Modelos en varias zonas del país a fin de tener información de comparación de cómo varían los parámetros con las diferencia de suelos, vegetación, altura sobre el nivel del mar, etc.

BIBLIOGRAFÍA

- Aparicio, F.J. (1999) Fundamentos de Hidrología de Superficie. Limusa, México, D.F.
- Cabrera Juan Modelo abcd – Simulación de caudales anuales, Universidad Nacional de Ingeniería. UNI - Lima
- Centro de Estudios Hidrográficos (CEH), (2002). Implementación del modelo hidrológico de Témez para la evaluación de recursos hídricos con grass gis. fase superficial y subterránea. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), Madrid.
- Chow, Ven Te (1964) Handbook of Applied Hydrology. McGraw-Hill, New York.
- González C.R., Yil L. M, Curiel L. D. (2003). Metodología de la Investigación Científica para las Ciencias Técnicas 2da. Parte: Organización y Ejecución de la Investigación Universidad de Matanzas
- Linsley, R.K. Jr.; Kohler, M.A.; Paulhus, J.L.H. (1949) Hidrología para Ingenieros. McGraw-Hill. New York
- Pizarro T. R. (1995). Calibración y validación de Modelos de Simulación Integral Hidrológica, en cuencas húmedas y semiáridas de Chile Central. Prof. Asociado Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Talca, Chile.
- Ponce V. M. (1989) Modelos Hidrológicos. "Engineering Hydrology", Editorial Prentice Hall.
- Villon Bejar M. Hidrología
- Wenndor Ch. Hidrología para Ingenieros Civiles