

Elaborar modelos hidrológicos al alcance de estudiantes universitarios

Roberto Fredy Avalos Lingan ¹

RESUMEN

La novedad de las implicaciones y consecuencias del cambio climático ha permitido, entre otros, el resurgimiento de la modelación matemática para predecir con cierto grado de certeza diferentes escenarios que faciliten la planificación para atenuar sus diferentes y complejos efectos. En el área de hidrología las investigaciones y las ofertas comerciales de modelos adaptados con nuevas tecnologías de programación y de sistema de información geográfica se han multiplicado.

Los objetivos de la investigación se centran en proponer dos modelos hidrológicos (A y B) propios y sencillos que permitan simular caudales medios mensuales. Uno de ellos es obtenido por innovación y el otro por conceptos sencillos de hidrología; con el fin de mostrar, sobre todo, a los estudiantes universitarios de las áreas de estudio del recurso agua, que la modelación hidrológica está a su alcance.

El modelo A al cual se le ha aplicado innovación, está basado en el balance de agua mensual propuesto por Thornthwaite y el modelo B es un modelo conceptual muy simple basado en los conceptos de hidrología básica. Ambos modelos simularon los caudales medios mensuales de la estación hidrométrica Los Encuentros en Agua Caliente. El índice de Nash-Sutcliffe permitió concluir que los resultados de las predicciones son alentadores.

Palabras Claves: *Modelo hidrológico, calibración, simulación y eficiencia de Nash-Sutcliffe*

¹ Profesor del Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, UNAH: robertofredy2010@gmail.com

ABSTRACT

The novelty of the implications and consequences of climate change has allowed, among others, the resurgence of mathematical modeling to predict with some degree of certainty different scenarios that facilitate planning to mitigate their different and complex effects. In the area of hydrology research and commercial offers of models adapted with new programming technologies and geographic information system have multiplied.

The objectives of the research are to propose two simple and hydrological models (A and B) that allow simulating average monthly flows. One is obtained by innovation and the other by simple concepts of hydrology; In order to show, above all, the university students of the areas that have to do with the water resource, that hydrological modeling is within their reach.

The model A to which innovation has been applied is based on the monthly water balance proposed by Thornthwaite and the model B is a very simple conceptual model based on the concepts of basic hydrology. Both models simulated the average monthly flows of the hydrometric station Los Encuentros in Agua Caliente. The Nash-Sutcliffe index allowed us to conclude that the results of the predictions are encouraging.

Palabras Claves: Hydrological model, calibration, simulation and Nash-Sutcliffe efficiency

INTRODUCCION

El uso de modelos hidrológicos aparentemente resurge dada la importancia que ellos tienen, en estos tiempos, donde la escasez de agua dulce, para los diferentes usos, se incrementa día a día. Uno de los elementos principales que ha influenciado en este problema, es la intervención del hombre sobre la naturaleza, ocurrida a lo largo del tiempo; sin considerar seriamente sus consecuencias. Esto ha trastocado el equilibrio natural de la misma, al grado que sus efectos son innumerables a la fecha actual y posiblemente, empeorándose para los años futuros (Naciones Unidas, 2017 y 1992). El interés de saber que va a pasar con la cantidad de agua disponible en los tiempos venideros y más aún, sabiendo que en la actualidad. Las evidencias indican que ha disminuido en cantidad y además, modificado el comportamiento y distribución de la misma, la modelación hidrológica viene a ser una de las herramientas que bien se puede utilizar para estudiar, a partir del pasado, presente y escenarios futuros, las posibilidades de cantidad y comportamiento del recurso agua con una mirada hacia adelante. Concretamente, disponer de información anticipada que permita fortalecer las perspectivas de una planificación seria es de mucho valor; a fin de garantizar el mínimo efecto en la calidad de vida de las personas.

Las universidades, a parte de la docencia, son las fuentes de producción y transmisión de nuevos conocimientos, a mencionar en las áreas de la ciencia y la tecnología (Reglamento de la Educación Superior decreto 142-89, La ley Orgánica de la Universidad Nacional Autónoma de Honduras Decreto 209-2004, Estatuto del Docente Universitario y sus Reformas, 2002). Dentro de esta responsabilidad nace la idea de presentar, sobre todo a los estudiantes de estudio del recurso agua y también a los profesionales especialistas sobre estos temas, dos modelos hidrológicos simples que podrían encaminarse, mediante la investigación, a modelos más completos y actuales.

El primer objetivo de este informe es presentar dos modelos hidrológicos que son denominados como Modelo A y Modelo B, que han sido elaborados, con la mayor sencillez, para simular caudales medios mensuales para la cuenca del rio Agua Caliente en Los Encuentros que contiene un área de cuenca de 2658 km². Se seleccionó esta cuenca simplemente porque se disponía en nuestra base de información algunos datos hidrológicos de la misma.

También es importante resaltar que la simpleza de la concepción de ambos modelos, aparentemente estos soportan datos insuficientes y posiblemente de baja calidad.

Como segundo objetivo es incentivar a los estudiantes universitarios y a profesionales especialistas a la innovación y creación de modelos que permitan predecir el comportamiento de variables; por su supuesto cada uno en función de su área de estudio y no depender tanto de los modelos comerciales, que han sido elaborados en otros países bajo sus propias condiciones.

Es importante mencionar, también, que ambos modelos no son modelos terminados y que necesitan mayor investigación; pero que podrían, con su simplicidad de elaboración, mostrar que no es difícil entrar al área de la modelación con el fin de aportar nuevos conocimientos y nuevas tecnologías que puedan colaborar en la solución de los problemas del país.

Modelos hidrológicos

Los modelos hidrológicos son simplificaciones de los procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren dentro de una o más unidades hidrográficas, llamadas también cuenca y que están compuestas de suelo, geología, morfología, cobertura vegetal, asentamientos humanos, etc., y que se encuentran expuestas a la influencia de los fenómenos atmosféricos y climáticos locales e intercontinentales.

Los modelos hidrológicos han sido clasificados de diferentes puntos de vista. A nuestro criterio, esto puede clasificarse de manera general en modelos hidrológicos analógicos, físicos y matemáticos. De los cuales los más usados, en la actualidad, son los matemáticos. Dentro de los matemáticos existen los denominados determinísticos, los probabilísticos y los combinados; es decir, parte determinística y parte probabilística. Dentro de los determinísticos se encuentran los estadísticos sin términos al azar y los conceptuales, y dentro de los conceptuales los empíricos y los propiamente conceptuales. Se menciona esto, por el motivo que los modelos elaborados en el presente artículo caen dentro del último modelo mencionado (propiamente conceptual).

Por otra parte cabe señalar también, que los modelos hidrológicos pueden aplicarse bajo un diseño distribuido (Jorquera E, Sin fecha) o no distribuido dentro de la cuenca. Además, con el apoyo de imágenes satelitales y de la teledetección la modelación puede realizarse de manera espacial y mult-temporal. En la actualidad con el avance de la tecnología en sistema de información geográfica SIG, se está impulsando el uso de esta herramienta para el apoyo de la modelación hidrológica. Conocido esto como integración de modelos hidrológicos con el SIG (Mendoza, M y al., 2002). Sobre esto, ya se encuentran artículos publicados en diferentes países.

Información disponible

Para llevar a cabo la investigación se utilizó datos de lluvia mensual (mm) y de evaporación mensual (mm) de las estaciones El Coyolar y Agua Caliente; estaciones que son manejadas por la Dirección de Recursos Naturales y Medio Ambiente. Con respecto a los caudales medios mensuales a utilizar durante la calibración se seleccionó los correspondientes a la estación hidrométrica Los Encuentros en río Agua Caliente (manejada por La Empresa Nacional de Energía Eléctrica) con un área de cuenca de 2658 km². Estos datos fueron obtenidos de la base de datos y fueron los que se dispuso para alcanzar los objetivos de la investigación. Es importante señalar que posiblemente existan datos de más estaciones de lluvia y también evaporación; ya que es una cuenca grande, pero como se mencionó antes, se trabajó con lo que se obtuvo de la base de datos. El periodo de estos datos fue de 1980 a 1996; es decir, 17 años de información.

El río Agua Caliente es afluente al río Grande y este al río Sulaco. Al lado Oeste del río Sulaco se encuentra el río Humuya y que juntos los dos son los afluentes principales del embalse El Cajón o llamado también Central Hidroeléctrica Francisco Morazán.

La Figura 1 muestra la ubicación general del área de estudio, La Figura 2 la ubicación de la estación hidrométrica Los Encuentros en el río Agua Caliente y la Figura 3 la ubicación de las estaciones de lluvia y evaporación.

Figura 1. Ubicación general del área de estudio



Figura 2. Ubicación de la estación hidrométrica Los Encuentros

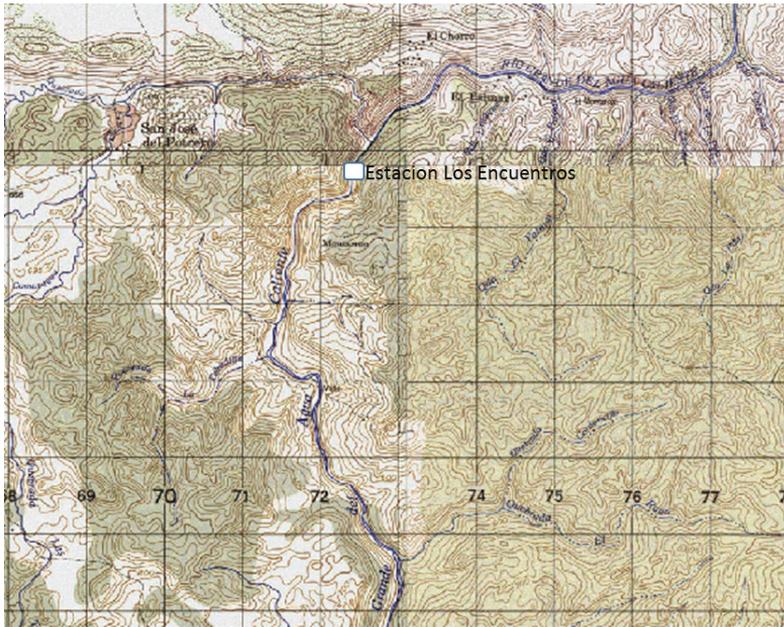
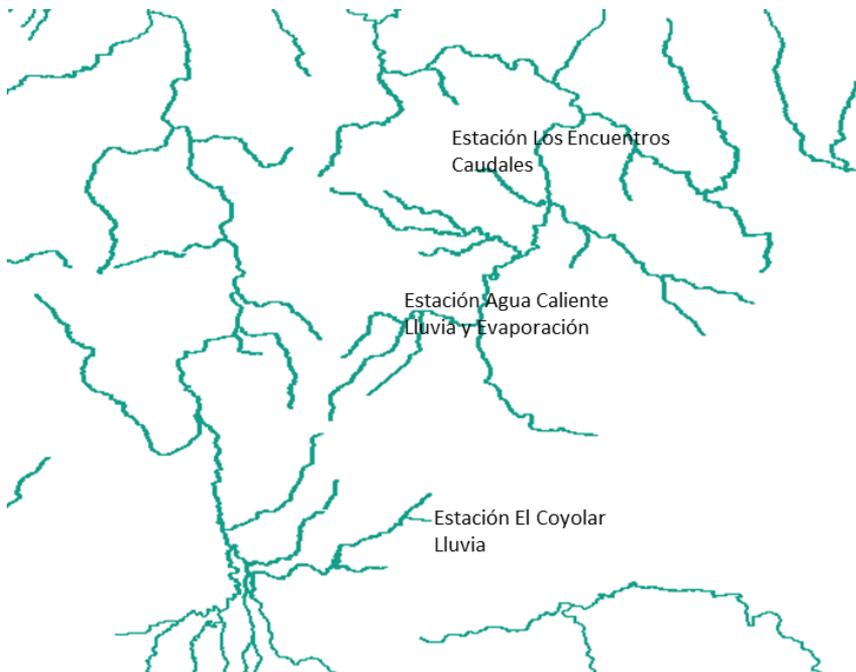


Figura 3. Ubicación de las estaciones de lluvia y evaporación



PROCEDIMIENTO

Modelo A

El modelo A esta basado en el planteamiento de balance de agua mensual propuesto por Thornthwaite (Thornthwaite, C, 1948, mencionado por Tuñón, C, 2000. Thornthwaite, C., Wilm, H., et al, 1944, obtenido de Marin, V. 2010. Thornthwaite and Mather 1955, obtenido de USGS 2010). Para aplicar el modelo de Thornthwaite se requiere disponer de una serie de datos mensuales de lluvia (P en mm/mes) y evapotranspiración potencial (ETP en mm/mes) de por lo menos 10 años de información. El promedio mensual de dichos datos son los datos de entrada para el balance; además se requiere de estimar una capacidad máxima de retención de agua dependiendo del tipo de suelo.

El balance de agua se realiza mes a mes y se inicia en el mes donde se tiene la certeza que la P inicia a ser es mayor que la ETP. El balance se desarrolla bajo el siguiente criterio. El Cuadro 1 muestra el balance el cual inicia en el mes de octubre y la capacidad máxima de retención de agua en el suelo es de 100mm (Remenieras 1965):

Habrá escurrimiento cuando hay excedente de agua; esto ocurre cuando el almacenamiento de agua en suelo (reserva de agua) es sobrepasado; es decir, cuando la suma de la reserva de agua en el suelo con la diferencia de P-ETP sobrepasa la capacidad máxima de retención de agua del suelo. De la diferencia de agua que queda, la mitad escurre en el mes y la otra mitad en el mes siguiente. Habrá déficit si en el mes la suma de la lluvia más la reserva del agua en el suelo no cubre la demanda de la ETP. El déficit será la diferencia. El coeficiente de humedad es simplemente el cociente entre P-ETP y la ETP.

Los conceptos del modelo de balance de Thornthwaite fueron respetados en el modelo A; pero la innovación consistió en adicionar parámetros al procedimiento de balance de agua de Thornthwaite, que permitan la calibración del modelo; es decir, realizar el ajuste del modelo a los datos observados mediante parámetros y además, que se pueda aplicar de forma continua a diferentes meses y años. Estos parámetros se centraron en las variables Excedente gobernado por el parámetro E1 y el Escurrimiento gobernado por el parámetro E2.

Cuadro 1

BALANCE DE AGUA MENSUAL SEGÚN EL METODO DE THORNTHWAITTE
Máxima Capacidad de retención de agua del suelo: 100 mm

		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	<u>OCT</u>	NOV	DIC	AÑO
1	ETP	11	16	31	51	84	109	127	115	83	50	24	14	715
2	P	58	66	69	64	70	74	51	55	56	80	79	82	804
3	Variac. Hum.	47	50	38	13	-14	-35	-76	-60	-27	30	55	68	
4	Reserva Agua	100	100	100	100	86	51	0	0	0	30	85	15	
5	ETR	11	16	31	51	84	109	102	55	56	50	24	14	603
6	Déficit Agua							25	60	27				112
7	Exced. Agua	47	50	38	13								53	201
8	Escorrimento	37	43	41	27	13	7	3	2	1	0	0	26	200
9	P-ETP	47	50	38	13	-14	-35	-76	-60	-27	30	55	68	
10	Coef. Humedad	4.27	3.13	1.23	0.25	-0.17	-0.32	-0.60	-0.52	-0.33	0.60	2.29	4.86	

Nota:

Las unidades están expresadas en mm/mes excepto la línea 10 que se encuentra en decimal y no tiene unidades

Las funciones que gobiernan los excedentes y el escurrimiento son:

F(Excedente, E1)

F(Escorrimento, E2)

Por otra parte, durante la calibración se puede llegar a ajustar también, la capacidad máxima de retención de agua del suelo. En resumen este modelo es manejado por dos parámetros.

Modelo B

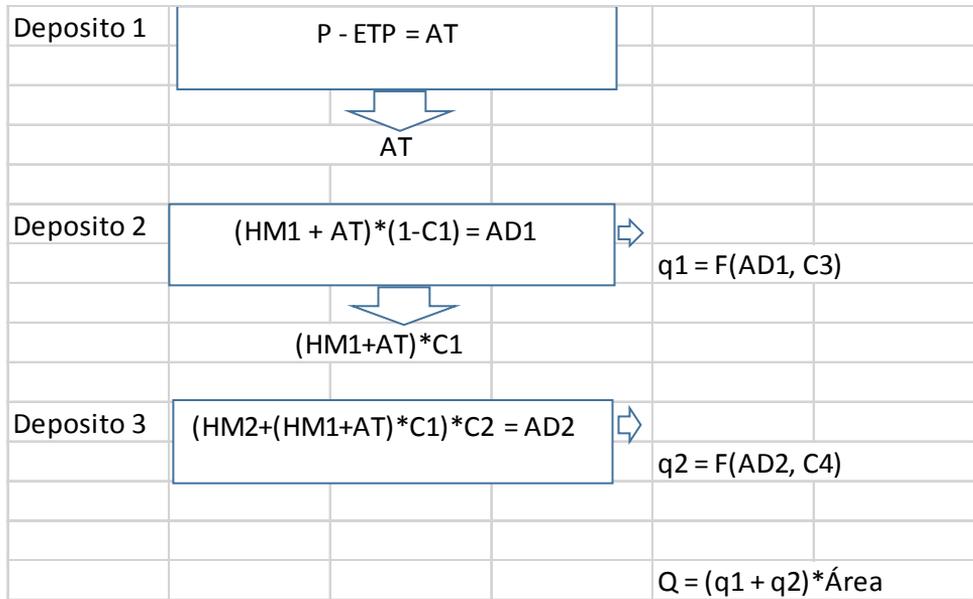
El modelo B es un modelo conceptual muy simplificado y simple, en el cual se ha tomado en cuenta solamente tres depósitos. El primer depósito retiene el agua de la diferencia (lluvia mensual – evaporación) y la sede al segundo depósito, el cual suministra agua al tercer depósito y además permite el escurrimiento denominado q_1 y el tercer depósito entrega agua como escurrimiento q_2 y además retiene también una cantidad de agua para la continuidad del escurrimiento de los meses siguientes. Toda la circulación del agua está expresada en mm/mes y además están gobernadas por funciones matemáticas. La suma de los escurrimientos parciales q_1 y q_2 es multiplicada por el área con el fin de calcular el caudal en m^3/s .

Las condiciones iniciales de humedad en el suelo están expresadas por HM1 para el primer depósito y HM2 para el segundo. La cantidad de agua que el depósito 1 cede al depósito 2 está gobernado por el parámetro C1 y lo que queda de agua para el escurrimiento q1 es gobernado por (1 - C1), llamada variable AD1. La cantidad de agua disponible para la escorrentía del depósito 3, llamada variable AD2; es decir, para la escorrentía q2 es gobernado por el parámetro C2. Las funciones matemáticas que gobiernan los escurrimientos q1 y q2 son:

$$q1 = F(AD1, C3)$$

$$q2 = F(AD2, C4)$$

La Figura 4. muestra el flujograma del modelo B



Calibración de los modelos A y B

Para el procedimiento de calibración de los modelos A y B se utilizó el método visual; en el cual los parámetros son sometidos a un análisis de sensibilidad con el fin de lograr que los caudales simulados se acerquen a los caudales observados.

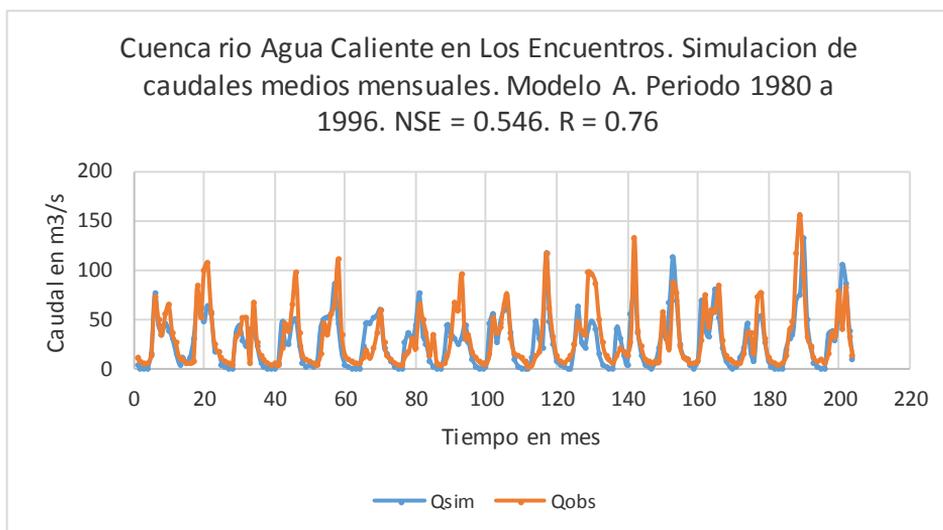
El coeficiente (Eficiencia) de Nash- Sutcliffe (NSE) fue el utilizado para medir el grado

de ajuste de la modelación (mencionado por Alcántara, A. Montalvo, N. Ingol, E. Validación de modelos hidrológicos lluvia-escorrentía para su aplicación a la cabecera de cuenca del río Jetepeque, 2014). Este coeficiente es muy utilizado para medir el grado de ajuste de un modelo hidrológico a datos observados de caudales. Es simplemente una relación entre la varianza de los datos (caudal simulado – caudal observado) con respecto a la varianza de los observados (caudal observado – la media de los caudales observados) y todo esto, restado de uno.

APLICACIÓN Y RESULTADOS

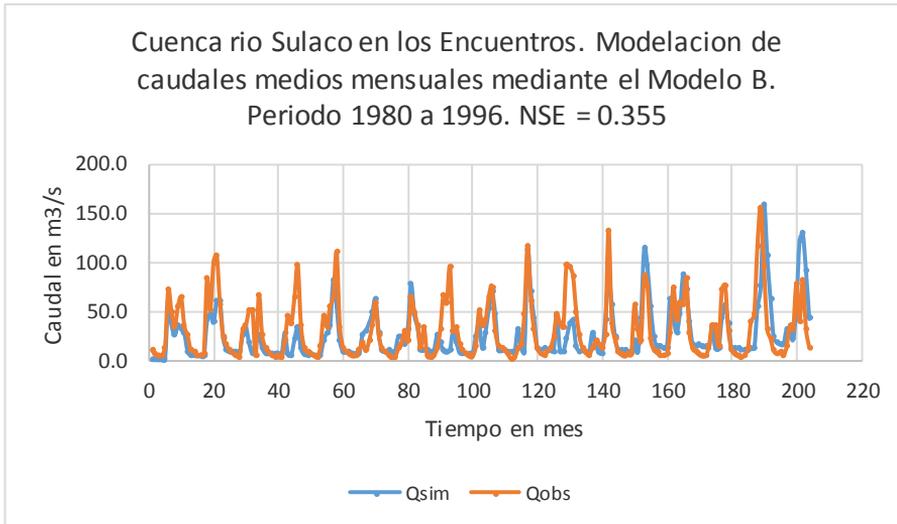
El modelo A es calibrado a los caudales medios diarios de la estación hidrométrica Los Encuentros en Agua Caliente para el periodo comprendido entre 1980 a 1996. La Figura 5 muestra el resultado de la calibración del modelo. El coeficiente NSE obtenido fue de 0.546; el cual se califica, dentro de los rangos del coeficiente, como bueno

Figura 5. Resultado de la calibración del Modelo A



De igual forma el modelo B fue calibrado para el periodo 1980 a 1996. La Figura 6 muestra los resultados. El coeficiente NSE obtenido fue de 0.346; el cual se califica, dentro de los rangos del coeficiente, como satisfactorio.

En cuanto al coeficiente de correlación línea la aplicación del modelo A es de 0.76 y del modelo B de 0.66.

Figura 6. Resultado de la calibración del Modelo B

DISCUSION

Los modelos A y B han sido concebidos bajo un criterio simplista y que además, se encuentran todavía en proceso de diseño. Estos han sido aplicados para simular caudales mensuales para la cuenca del río Agua Caliente a la estación de aforo Los Encuentros con un área de drenaje de 2658 km².

Los datos disponibles de lluvia y evaporación fueron obtenidos de las estaciones Agua Caliente y El Coyolar. La primera se ubica en la parte media de la cuenca y la otra en la parte alta (al extremo sur de la cuenca). Todo esto nos hace comprender que la información disponible nos es suficiente para representar el comportamiento de la lluvia y la evaporación para una cuenca de esa dimensión. Las normas del Proyecto Hidrometeorológico Centroamericano patrocinado por la Organización Meteorológica Mundial indican que el límite recomendado es de 10 estaciones (Proyecto Hidrometeorológico Centroamericano 1971).

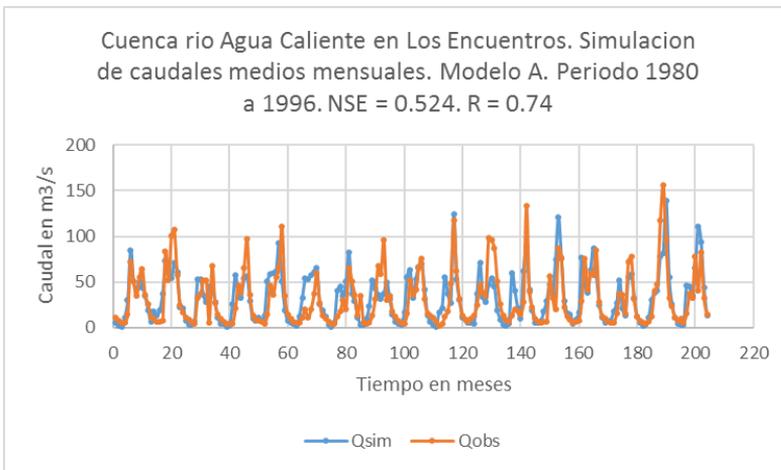
Ambos modelos simulan los diferentes eventos del comportamiento hidrológicos de los caudales medios mensuales del río Agua Caliente durante el periodo 1980 a 1996; es decir, los caudales máximos, promedios y mínimos. El grado de calidad del ajuste de los mismos, es función de la conceptualización de ambos modelos y sobre todo, de la calidad de los datos disponibles (lluvia, caudal y evaporación); por supuesto, también, de la cantidad de estaciones medidoras y de su distribución a lo largo y

ancho de la cuenca. En nuestro caso solamente se utilizó dos estaciones climatológicas para una cuenca de 2658 km².

El proceso de calibración de los modelos A y B fueron orientados a obtener el valor más alto del coeficiente Nash-Sutcliffe, los resultados obtenidos se muestran alentadores y sobre todo, aparentan soportar datos con cantidad y calidad insuficiente. Probablemente investigaciones posteriores podrían proporcionar mayor conocimiento sobre este tema.

En la Figura 7 y 8 se muestran nuevas calibraciones de los modelo A y B. Donde se puede observar, visualmente, que los resultados aparentemente parecen tener un mejor ajuste de lo que se presenta en las Figura 5 y 6. El valor obtenido de NSE para el modelo A de NSE es de 0.524 y para el modelo B de 0.221. Esto no lleva a reflexionar que habría que considerar nuevos calificadores de ajuste de calibración de un modelo.

Figura 7. Nueva calibración del modelo A

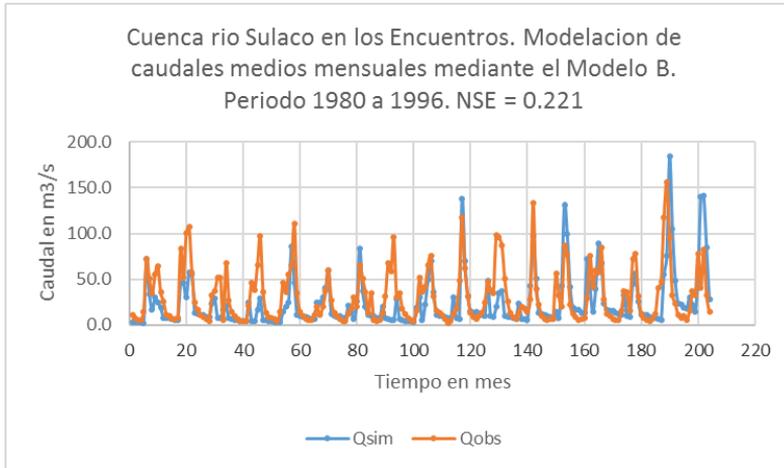


A parte de lo mencionado en los párrafos anteriores de este capítulo, uno de los objetivos de la investigación fue mostrar, que en el área de modelos hidrológicos, es posible aplicar los conceptos de la innovación y además, que partiendo de conocimientos generales de hidrología, es también posible iniciar diseños de modelo hidrológicos.

Los resultados obtenidos a lo largo de la investigación muestran una posible forma de incentivar a los estudiantes universitarios de áreas relacionadas con el recurso agua,

a que ellos mismos puedan iniciar el desarrollo de capacidades en modelación hidrológica y continuar avanzando con el uso de tecnologías recientes que cada día son nuevas. El desarrollo de esto, permitirá a través del tiempo enriquecer el estado actual de la ciencia y la tecnología.

Figura 8. Nueva calibración del modelo B



CONCLUSION

A pesar de la simplicidad de conceptualización en que fueron diseñados los modelos A y B, y además, que todavía no se encuentran en la etapa final de diseño, estos proporcionaron simulaciones de caudales medios mensuales bastante alentadores. Se mostró, con un ejemplo, que en el área de la hidrología se puede aplicar los conceptos de la innovación. El método de balance de Thornthwaite de ser un procedimiento rígido de promedios mensuales, con pequeños agregados puede convertirse en un modelo conceptual continuo.

Con conceptos de hidrología básica se mostró que es posible iniciar el diseño de un nuevo modelo hidrológico, que en este caso fue por medio de un modelo conceptual de depósitos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Naciones Unidas (2017) *Adaptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos*.
- Alcántara A, Montalvo N, Mejía A, Ingol E. (2014). *Validación de modelos hidrológicos lluvia-escorrentía para su aplicación a la cabecera de cuenca del río Jetepeque*. Universidad Nacional de Agraria La Molina. Programa de Doctorado en Ingeniería de Recursos Hídricos. Lima, Perú.
- USGS. (2010). *A modified Thornthwaite – Mather. Soil-water-balance code for estimating ground water recharge*. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia.
- Marín, V. (2010). *Evaluación de la relación entre la evapotranspiración potencial teórica y la evaporación registrada en los Departamentos de Cundinamarca y valle del Cauca*. Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá.
- La ley orgánica de la Universidad Nacional Autónoma de Honduras* (2004). La Gaceta. Decreto 209-2004.
- Mendoza M, Bocco G, Bravo M, Siebe C, Ortiz M. (2002) *Spacially distributed hydrological modeling a review of componentes, integration levels and implications for estimating hydrological processes in no-instrumented bassin*. Instituto de Ecología, UNAM.
- Tuñón, C. (2000). *Determinación experimental del balance hídrico del suelo y evaluación de la contaminación asociada a las prácticas agrícolas*. Tesis Doctoral. Universidad de Jaume I Castellón.
- Naciones Unidas. (1992). *Convención marco de Las Naciones Unidas sobre Cambio Climático*.
- Reglamento de la Ley de Educación Superior de Honduras*. (1989). Decreto 142- 1989.
- Proyecto Hidrometeorológico Centroamericano patrocinado por la OMM. (1971) *Manual de Instrucciones: estudios hidrológicos*. San José Costa Rica.
- Jorquera E, Weber J, Reyna S. (s.f). *Revisión del estado del arte en la modelación hidrológica distribuida e integrada*. Laboratorio de Hidráulica, Facultad de Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional.
- Thornthwaite, C.W., and Mather, J.R. (1955) *The water balance*. Centerton. Laboratory of climatology, Publication in Climatology.