

Aplicabilidad del modelo hidrológico SWAT en cuencas con características extremas – Cuencas de los ríos Taquiña y Tolomosa

Oscar Zárate Bermúdez

Departamento de Ciencias Exactas e Ingeniería, Universidad Católica Boliviana San Pablo, calle M. Marquez s/n esq. Parque J. Trigo, Tupuraya, Cochabamba

e-mail: zaros90b@gmail.com

Resumen

El modelo SWAT predice, a lo largo del tiempo, el impacto de las prácticas de manejo de cultivos en la disponibilidad de agua, generación de sedimentos y químicos agrícolas en cuencas de gran extensión, con distintos tipos de suelo, uso y prácticas de cultivo. El modelo SWAT fue desarrollado por la ARS (USDA) para cuencas agrícolas de Texas, EEUU, y desde su creación ha existido gran interés por evaluar su desempeño en cuencas con características diferentes a las de su diseño. El presente estudio examina la aplicabilidad del modelo en dos cuencas de montaña de Bolivia, la cuenca Taquiña (área de modelación de 11 km², pendiente promedio de 200 m/km) y la cuenca Tolomosa (área de modelación 420 km², pendiente promedio de 77 m/km). Utilizando series históricas de datos hidrometeorológicos, se ha verificado que el modelo es capaz de simular con precisión los diferentes componentes de la generación de flujo, dada la estacionalidad en la distribución de las precipitaciones, consistiendo en un periodo seco de seis meses, un periodo de transición y un periodo lluvioso de 4 meses. Los resultados de la investigación indican que con una adecuada aplicación y procesamiento de datos de entrada, el modelo SWAT es capaz de simular el comportamiento del flujo superficial en ambas cuencas.

Palabras clave: hidrología, modelación hidrológica, cuencas de montaña, análisis de escenarios, modelo SWAT

1 Introducción

El propósito del estudio fue evaluar el desempeño del modelo AVSWAT 2000 [1] en dos cuencas de montaña de Bolivia, pertenecientes a distintas zonas climáticas y de comportamiento hidrológico diferente.

La importancia de calibrar y validar un modelo hidrológico se refleja en su aplicabilidad de extrapolar su desempeño a cuencas con similares características

hidrológicas y fisiográficas, debido principalmente a la escasa información fluviométrica que se tiene en nuestro medio, referida a datos diarios y series históricas relativamente largas.

La primera cuenca seleccionada es la cuenca Taquiña (11 km²; pendiente promedio 200 m/km), localizada en el valle central Cochabamba, sobre la cordillera Tunari. En el año 1991, la cuenca fue instrumentada para recolectar datos climáticos y de caudal para desarrollar distintos estudios y trabajos de investigación como parte del Programa Manejo Integral de Cuencas, PROMIC [2], proyecto encargado de controlar los procesos de erosión en las cuencas de la cordillera y atenuar los efectos de las crecidas que se originan en ellas y desembocan en el valle central de Cochabamba, donde existen varios centros poblados y áreas agrícolas, ocasionando serios problemas de inundación y pérdidas de cultivo.

La segunda cuenca es la cuenca de Tolomosa (420 km²; pendiente promedio 77 m/km), ubicada al sudeste de la ciudad de Tarija, perteneciente a las serranías de Sama. Es una cuenca estratégica para la ciudad de Tarija porque el escurrimiento de la cuenca es utilizada para riego, agua potable y generación de energía eléctrica a través del Proyecto Múltiple San Jacinto [3]. En el año 1989 fue acabada la construcción de la presa de San Jacinto, proyecto que demandó el levantamiento de datos de precipitación y caudal a la salida de la cuenca Tolomosa en los años 1976 a 1984, datos que son utilizados para calibrar el modelo AVSWAT en este periodo.

2 Metodología

Para ambas cuencas la metodología fue la misma y consistió en los siguientes pasos:

- Localización espacial de las estaciones climatológicas y limnigráficas utilizadas en cada una de las cuencas.
- Control de calidad de datos climatológicos (precipitación, temperatura, humedad relativa, viento, radiación solar) y de datos de caudal a nivel diario, utilizando métodos simples de correlación entre estaciones, curvas Doble Masa y Curvas Acumuladas, determinando el periodo de modelación (etapas de calibración y validación).
- Georeferenciación y procesamiento de los mapas digitales de elevación (DEM), para definir la red de drenaje de las cuencas (ríos) y en base a ella determinar el número de subcuencas que serán introducidas en el modelo.
- Procesamiento de los mapas de cobertura vegetal, identificando unidades de uso de suelo compatibles con las unidades que maneja el modelo AVSWAT [4].
- Procesamiento de los mapas de suelos, levantando la información que requiere el modelo en base a campañas de campo y estudios de suelos disponibles para las cuencas.

2.1 Cuenca Taquiña

La información climática proviene de tres estaciones ubicadas dentro la cuenca y distribuidas estratégicamente cubriendo la variación altitudinal de la cuenca; las estaciones son Laguna Taquiña, Jana Mayu y Linkupata.

El rango de variación altitudinal de la cuenca va de 3200 m.s.n.m hasta 4300 m.s.n.m. con una altura media de 3960 m.s.n.m., y una pendiente promedio de 30%. El régimen pluviométrico indica que la época lluviosa es de octubre a marzo, con el mes más lluvioso enero (180 mm) y teniendo entre los meses de junio y julio, la época seca del año. La precipitación promedio de la cuenca es de 745 mm.

La información de caudal proviene de la estación limnigráfica TQA-2 ubicada en la intersección del río Taquiña con la cota 3200 m.s.n.m. Para la determinación del escurrimiento en el área de aporte de TQA-2, se requiere los datos de la estación limnigráfica TP-1 que mide el caudal que sale del embalse Taquiña, ubicado aguas arriba de la cuenca de estudio.

La disponibilidad simultánea de datos en ambas estaciones limitó la serie histórica de datos de caudal en la cuenca de aporte a TQA-2, especialmente en época de crecidas, donde se presentaron muchas inconsistencias, reduciéndose a un 60% la disponibilidad de datos a nivel anual [4]. El procesamiento de la información confiable da un escurrimiento promedio anual de 110 L/s en la cuenca.

Debido al tamaño de la cuenca y la uniformidad en cuanto a las características hidromorfológicas, se decidió modelar la cuenca como un solo elemento con una unidad de respuesta hidrológica (HRU) dominante, que combina la unidad de uso de suelo; pastizal (*pasture*), con tipo de suelo; franco arenoso (*sandy loam*) y el número de curva CN en condición normal de 66.

En la Figura 1 se puede observar la localización de la cuenca Taquiña respecto a la ciudad de Cochabamba y la distribución de las estaciones climatológicas y limnigráficas en la cuenca.

2.2 Cuenca Tolomosa

La información climatológica proviene de tres estaciones ubicadas dentro de la cuenca (San Andrés, Pino y Calderillas) y una estación próxima a ella (AASANA Tarija) que cubren la variación altitudinal de la cuenca. En la Figura 1 se presenta la ubicación de Tolomosa respecto a la ciudad de Tarija y la distribución de las estaciones climatológicas y limnigráfica, además de las subcuencas que componen la cuenca.

La información de caudal proviene de la estación limnigráfica Tolomosa, ubicada en la intersección del río Tolomosa con la cota 1860 m.s.n.m. lugar donde actualmente está construida la presa San Jacinto. El procesamiento de esta información, da un escurrimiento promedio anual de 600 L/s en la cuenca [5].

El rango de variación altitudinal de la cuenca va de 1860 m.s.n.m hasta 4500 m.s.n.m., con una altura media de 2200 m.s.n.m y una pendiente promedio de 12%. La

precipitación promedio de la cuenca es de 1016 mm, el régimen pluviométrico indica que la época lluviosa va de octubre a marzo, reportando al mes de enero como el de mayor precipitación (220 mm) y los meses de junio, julio y agosto como meses de estiaje [6].

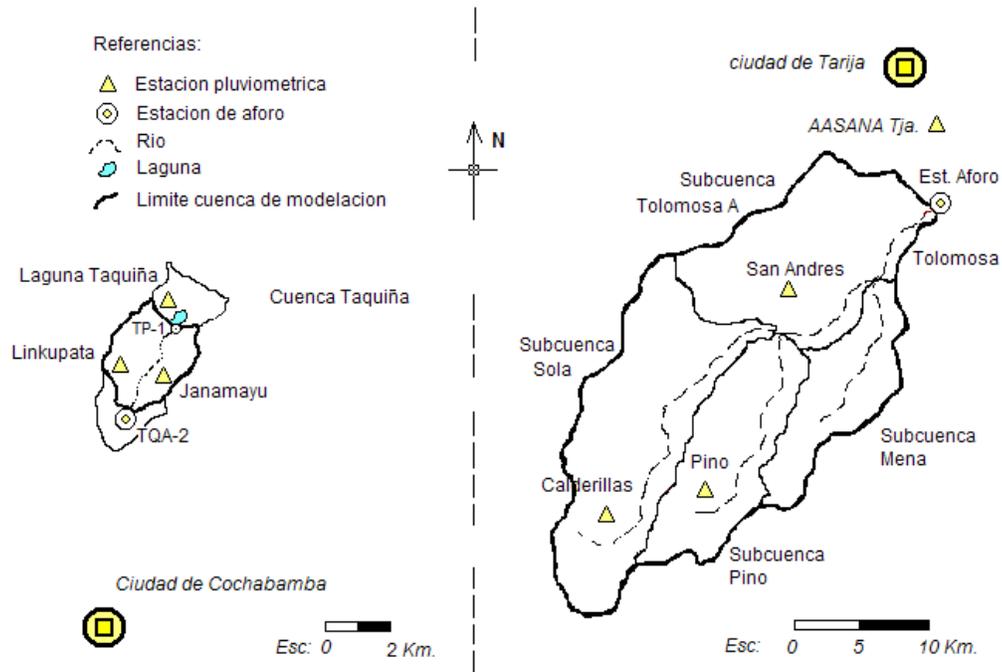


Figura 1: Ubicación de las estaciones climatológicas y limnigráficas en las cuencas Taquiña y Tolomosa

Debido al tamaño y red de drenaje de la cuenca, se decidió modelar la misma subdividiéndola en cuatro subcuencas; Pino, Sola, Mena y Tolomosa A. Cada subcuenca presenta similitud en cuanto a las características de cobertura vegetal y suelo, razón por la cual se empleó un HRU dominante para cada una de ellas. En la Tabla 1 se presenta la cobertura vegetal y el tipo hidrológico de suelo dominante en las subcuencas, además del porcentaje de área que representa cada una y el número de curva CN en condición normal.

Tabla 1. Cuenca Tolomosa, uso de suelo y suelo dominante por subcuencas (HRU)

Subcuenca	HRU Dominante		Area (%)	CN
	Cobertura vegetal	Tipo hidrológico suelo		
Tolomosa A	SPAS: Pastizal verano	A	0,31	56
Mena	PAST: Pastizal	A-B	0,15	60
Sola	PAST: Pastizal	B	0,34	65
Pino	WPAS: Pastizal invierno	B	0,20	62

2.3 Periodos de modelación, calibración y validación

En la cuenca Taquiña, las especificaciones de control para la simulación continua del proceso precipitación-escorrentía, ha tomado el periodo 1 de agosto de 1994 a 31 de julio de 1977 para la calibración, y los periodos 1° de agosto de 1998 al 31 julio de 1999 y 1° de agosto de 2000 a 31 julio de 2001, para la validación. En la cuenca Tolomosa, el periodo 1° de agosto de 1977 a 31 de julio de 1981, fue tomado para la calibración y el periodo 1° de agosto de 1981 al 31 julio de 1984, para la validación.

2.4 Ajuste y calibración

El ajuste y calibración fue realizado utilizando el método de optimización sucesiva, es decir los valores de los parámetros del modelo AVSWAT2000 fueron cambiados siguiendo un análisis de prueba y error, hasta que se alcanzaron buenas respuestas del modelo (comparaciones de caudal modelado con caudal medido). En la Tabla 2, se presentan los parámetros finales del modelo, ajustados como resultado del proceso de calibración, tanto en la cuenca Taquiña como en las subcuencas de la cuenca Tolomosa.

También en este proceso se estableció la sensibilidad del modelo a la variación de los parámetros, así como se identificaron los parámetros que tienen mayor influencia en los diferentes componentes del escurrimiento. Por otro lado, los términos estadísticos utilizados para la comparación de hidrogramas medidos y modelados son: *Mean Absolute Error* (MAE o Error Medio Absoluto), *Desviación Estándar* (STD), *Root Mean Squared Error* (RMSE o Raíz Cuadrada del Cuadrado de las Diferencias), *Efficiency* (EF o Eficiencia – Nash & Sutcliffe), *Coefficiente de Determinación* (CD) y *Coefficiente de Correlación* (R^2 o CC^2), [7].

Tabla 2. Valores calibrados de los parámetros de AVSWAT en a modelación de las cuencas Taquiña y Tolomosa

SWAT			Cuenca Taquiña		Cuenca Tolomosa		
Grupo	Parámetros	Unidades	Subc. TQA-2	Subc Tolomosa A	Subc. Mena	Subc. Sola	Subc. Pino
Mqnt	CN	--	66	56	60	65	62
Mgnt	USLE_P	--	0,90	0,9	0,9	0,9	0,9
Soil	SoI_AWC	mm/mm	0,10	0,18	0,22	0,22	0,22
Soil	SoI_K	mm/h	12,0	35	12	7	7
Soil	USLE_K	--	0,34	0,12	0,14	0,13	0,12
Sub	CH_K1	mm/h	0,50	30	12	5	12
Sub	CH_N1	--	0,05	0,35	0,03	0,05	0,03
Hru	OV_N	--	0,40	0,25	0,25	0,15	0,15
Hru	SLSUBBSN	m	10,0	30	30	10	10
Hru	SLOPE	m/m	0,24	0,1	0,1	0,35	0,25
Hru	CANMX	mm	5	6	5	5	5
Hru	ESCO	--	0,95	0,98	0,98	0,98	0,98
Hru	EPCO	--	1,0	0,4	0,4	0,4	0,4

Rte	CH_N2	--	0,05	0,035	0,03	0,05	0,03
Rte	CH_K2	mm/h	0,5	35	12	5	12
Rte	CH_EROD	--	0,5	0	0	0	0
Gw	GW_Delay	d	33	50	53	60	60
Gw	ALPHA_BF	d	0,033	0,1	0,1	0,1	0,1
Gw	GWQMN	mm	0,50	0,5	0,5	0,5	0,5
Gw	GW_REVAP	mm	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Gw	REVAPMN	mm	50	1	1	1	1
Gw	RCHRG_DP	--	0,0	0,05	0,05	0,05	0,05
Gw	LAT_TIME	d	13	15	15	15	15
Gw	SHALLST	mm	700	200	200	200	200

3 Resultados y discusión

Los parámetros finales ajustados presentados anteriormente, permitieron establecer los parámetros de control de ajuste en la calibración y validación del modelo que se presentan en la Tabla 3, donde se puede apreciar que para la cuenca Taquiña, la EF es de 0,67 para la calibración y 0,54 para la validación, valores considerados como aceptables tomando en cuenta la limitación en la calidad de datos de caudal medidos. En la cuenca Tolomosa, el coeficiente EF presenta un valor de 0,71 para la calibración y 0,63 para la validación, valores considerados como de buen desempeño tomando en cuenta resultados obtenidos en diferentes estudios de modelación con SWAT [8, 9]. Para otros parámetros relevantes como R^2 , se alcanzaron valores de 0,84 y 0,85, considerados como muy buenos.

Tabla 3. Resultados del análisis de comparación de hidrogramas medidos y modelados, en las etapas de calibración y validación del modelo AVSWAT

Parámetro estadístico	Taquiña		Tolomosa	
	Calibración	Validación	Calibración	Validación
Error Medio Absoluto (MAE):	0,03	0,10	2,64	2,32
Desviación Estándar (STD):	0,05	0,17	4,46	3,55
<i>Root Mean Squared Error</i> (RMSE)	0,08	0,22	7,98	6,40
Eficiencia (EF)	0,67	0,54	0,71	0,63
Coefficiente de Determinación (CD)	1,14	1,45	1,10	0,84
Coefficiente de correlación R^2 o CC^2	0,83	0,77	0,85	0,84

La sensibilidad de los parámetros del modelo fue examinado con detalle a través del análisis estadístico realizado con la planilla electrónica de control de ajuste [10] comparando los hidrogramas de caudal medido y simulado. Los resultados de este análisis indican que en las cuencas de Tolomosa, los parámetros de mayor incidencia en la escorrentía son: Conductividad hidráulica saturada (Sol_K), Contenido

disponible de agua en el suelo (Sol_AWC), Retardo del flujo subterráneo (GW_Delay), Exponente de recesión del flujo base (ALPHA_BF).

En la cuenca Taquiña, los parámetros de mayor incidencia son los mismos que se determinaron para Tolomosa, incluyendo el número de curva CN y el tiempo de viaje lateral del flujo subsuperficial (LAT_TIME).

En la cuenca Taquiña, los resultados del modelo subestiman los caudales picos en época de crecidas y en época de estiaje existe una buena correspondencia entre la magnitud de los caudales medidos y modelados. En general, el caudal promedio diario medido es de 110 L/s versus un caudal modelado de 86 L/s. En la Figura 2 se presentan dos gráficas, la primera muestra el volumen acumulado de caudal medido versus el volumen acumulado de caudal modelado y la segunda presenta el rango de valores de caudal medido y modelado.

En la cuenca Tolomosa, el caudal diario medido (600 L/s) es muy similar al caudal diario modelado (586 L/s), existiendo una diferencia de 3% entre los resultados medidos y modelados. En la Figura 3 se presentan las gráficas que muestran el volumen acumulado de caudal medido versus el volumen acumulado de caudal modelado y el rango de valores de caudal medido y modelado.

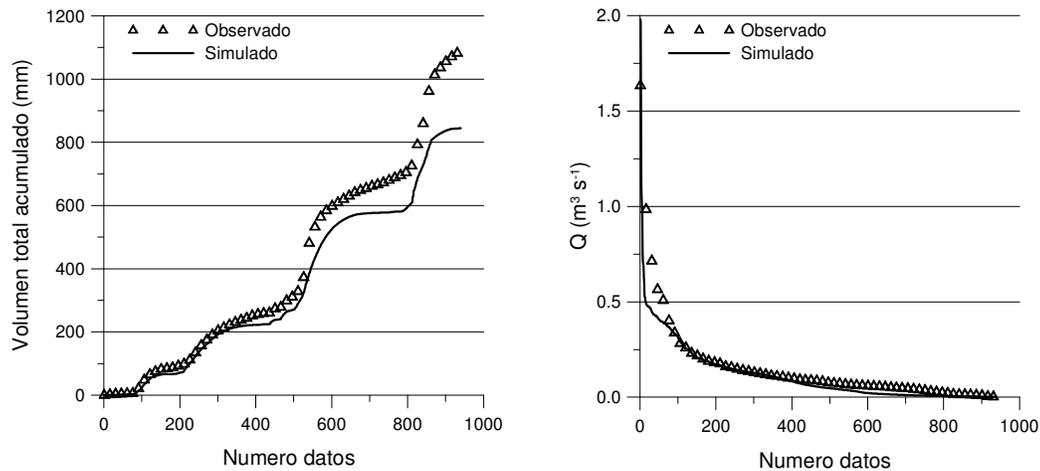


Figura 2: Cuenca Taquiña, volumen total acumulado de escurrimiento medido y modelado; y clasificación de caudales medidos y modelados de acuerdo a su magnitud

En las Figuras 4 y 5 se presentan las relaciones de caudal medido y modelado para las etapas de calibración y validación de la cuenca Taquiña y Tolomosa respectivamente. En general existe una buena correlación entre estas variables, con excepción de la estimación de caudales de crecida en la cuenca Taquiña que presenta una tendencia a subestimar los valores.

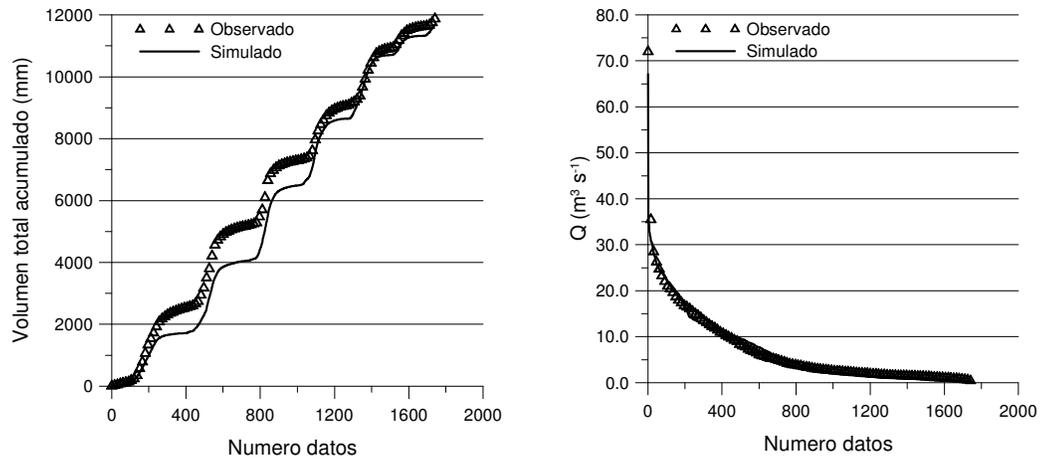


Figura 3: Cuenca Tolomosa, volumen total acumulado de escurrimiento medido y modelado; y clasificación de caudales medidos y modelados de acuerdo a su magnitud

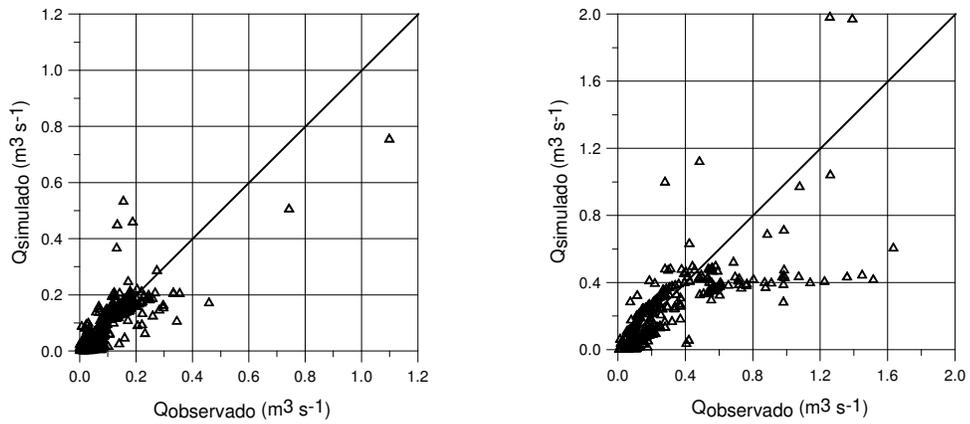


Figura 4: Cuenca Taquiña, relación de caudales medidos ($Q_{\text{observado}}$) y modelados (Q_{simulado}) en la etapa de calibración y validación

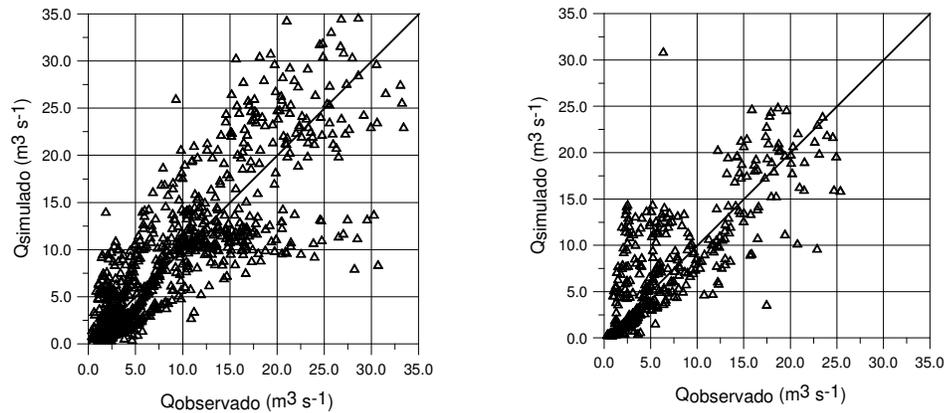


Figura 5: Cuenca Tolomosa, relación de caudales medidos ($Q_{\text{observado}}$) y modelados (Q_{simulado}) en la etapa de calibración y validación

4 Conclusiones

El modelo SWAT tuvo resultados aceptables en la modelación de la cuenca Taquiña y resultados buenos en la modelación de la cuenca Tolomosa (Valores de EF mayores 0,60 se consideran buenos), esta diferencia se debe a la calidad de datos medidos de caudal que se tienen para ambas cuencas, en la cuenca Taquiña se tuvo muchos problemas en obtener caudales medidos en época de lluvias.

El buen desempeño de un modelo hidrológico está condicionado a la calidad de los datos requeridos como datos de entrada, éste es el principal problema en los modelos semidistribuidos y distribuidos. Sin embargo, un buen conocimiento de los procesos de modelación y control de calidad de los datos disponibles puede ayudar a resolver esta limitación.

Para finalizar y como se mencionó anteriormente, la limitación que todavía existe en nuestro medio para disponer de información fluviométrica medida a nivel diario y con un registro histórico mínimo de más de cinco años, hace que el calibrar y validar adecuadamente un modelo hidrológico permita su aplicación en cuencas vecinas o de regiones similares que guarden características hidrológicas y fisiográficas similares a la de la cuenca en la que fue calibrada.

Referencias

- [1] S.L. Neitsch, J.G. Arnold, J.R. Kiniry, J.R. Williams. Modelo AV-SWAT 2000, USDA, *Servicio de investigación Agrícola, Temple, TX 76502*, 2001.
- [2] P. López, E. Montenegro. Caracterización y uso de variables hidrometeorológicas medidas en la cuenca Taquiña. *LHUMSS-PROMIC, Serie Estudios Hidrológicos, 3*, 1994.
- [3] Prefectura del Departamento de Tarija. Proyecto Múltiple San Jacinto - Objetivos y Alcance. *SIBTA-ARPMJS-Tarija*, 1988.

-
- [4] O. Zarate. Análisis de la hidrología de una cuenca de montaña con datos hidrológicos limitados y de baja calidad. *Programa IUPWARE, Universidades K.U. Leuven y V.U. Bruselas, Bélgica*, 2004.
- [5] O. Zarate. Procesamiento de datos hidrometeorológicos: Cuenca Tolomosa. *Programa INIBREH, Tarija, Bolivia*, 2005.
- [6] O. Zarate. Modelación Hidrológica - Cuenca Tolomosa, AVSWAT 2000. *Programa INIBREH, Tarija, Bolivia*, 2005.
- [7] R.F. Vázquez. Evaluación del desempeño de modelos conceptuales y distribuidos para sistemas hidrológicos medianos. *Tesis de Doctorado No. 556, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil, K.U. Leuven, Bélgica.*, 38-62 pp, 2003.
- [8] B.M. Watson, M. Ghafouri, S. Selvalingam. Aplicación del modelo SWAT en el balance hídrico de la cuenca Woody Yaloak, Australia. *TWRI Reporte Técnico, 2da Conferencia Internacional del Modelo SWAT*, 103 pp, 2003.
- [9] C.A. Spruill, S.R. Workman, J.L. Taraba. Simulación a nivel diario y mensual de caudales para una cuenca pequeña usando el modelo SWAT. *Sociedad Americana de Ingenieros Agrícolas*, 43(6), 1431-1439, 2000.
- [10] B. Biesbrouck. CALIBRA planilla electrónica para analizar resultados de modelación. *Facultad de Ciencias Agrícolas y Biológicas, K.U. Leuven, Bélgica*, 2003.