



# **Reconstruction of the time series of monthly inflows in the La Angostura reservoir in Cochabamba-Bolivia through water balance and hydrological modeling**

## **RECONSTRUCCIÓN DE LA SERIE DE CAUDALES MENSUALES DE INGRESO AL EMBALSE DE LA ANGOSTURA EN COCHABAMBA-BOLIVIA MEDIANTE BALANCE Y MODELACIÓN HIDROLÓGICA.**

Villazón Mauricio F.<sup>1</sup>, Patzi Erwin A.<sup>1</sup>

1 Laboratorio de Hidráulica, Universidad Mayor de San Simón – Avenida Petrolera km 4.2 Cochabamba, Bolivia

[mauricio.villazon@fcyt.umss.edu.bo](mailto:mauricio.villazon@fcyt.umss.edu.bo), [epatzisdos@gmail.com](mailto:epatzisdos@gmail.com)

Keywords: WEAP, water balance, La Angostura reservoir

Palabras Clave: WEAP, balance hídrico, embalse de La Angostura

Abstract:

The present investigation was carried out to reconstruct the monthly continuous series of inflows to the La Angostura reservoir for the period 1980-2016, with observed series of reservoir levels for the period 2007-2016. With the hypsometric curve of the reservoir and the daily levels recorded by the number one irrigation system in Cochabamba, a water balance was drawn from the reservoir, determining the continuous series of inflow to the system for the observation period (2007-2016). This continuous series of income flows is used to calibrate the WEAP hydrological model. A hypothesis of exploitation of the hydric resource in the upper part of its basin is proposed, which justifies a reduction in the volumes of entrance to the reservoir since the long-term runoff coefficients have an average value of 0.05 that are far from 0.2 to 0.3 reported in the literature for this type of ecosystem.

It was possible to calibrate the WEAP hydrological model and with the calibrated model after applying the hypothesis of the water use scenario in the upper basin an efficiency of 0.86 was reached, this model was used to reconstruct the historical series of inflows to the reservoir. With the reconstructed series of inflows to the reservoir, it is intended to infer the water supply of the upper valley.

Resumen:

La investigación fue realizada para reconstruir la serie continua mensual de caudales de ingreso al embalse de La Angostura para el periodo 1980-2016, contando con series observadas de niveles del embalse del periodo 2007-2016. Con la curva hipsométrica del embalse y los niveles diarios registrados por el sistema número uno de riego de Cochabamba se elaboró un balance hídrico del embalse determinando la serie continua de caudal de ingreso al sistema para el periodo de observaciones (2007-2016). Esta serie continua de caudales de ingreso es utilizada para calibrar el modelo hidrológico WEAP. Se plantea una hipótesis de explotación del recurso hídrico en la parte alta de su cuenca de aporte la cual justifique una reducción en los volúmenes de ingreso al embalse ya que los coeficientes de escorrentía a largo plazo tienen un valor medio de 0.05 que están alejadas de los 0.2 a 0.3 reportados en la literatura para este tipo de ecosistemas.

Se logro calibrar el modelo hidrológico WEAP y con el modelo calibrado luego de aplicar la hipótesis del escenario de aprovechamiento de agua en la cuenca alta se alcanzo una eficiencia de 0.86, este modelo fue utilizado para reconstruir la serie histórica de caudales de ingreso al embalse. Con la serie reconstruida de caudales de ingreso al embalse se pretende inferir la oferta hídrica del valle alto.

### 1. INTRODUCCIÓN

Los cambios climáticos que se vienen dando en nuestro planeta, sumado con la expansión demográfica agresiva y la industrialización, hacen necesario que se realice un análisis de los recursos hídricos de cada zona, priorizando el consumo humano, agrícola o con otros fines ambientales, al requerir una evaluación hídrica natural en la cuenca de

estudio se optó por el uso del programa WEAP el cual es un modelo para la evaluación y planificación de los recursos hídricos que nos permitirá generar escenarios para la planificación de los recursos hídricos, para el presente estudio se realizó la reconstrucción de caudales de ingreso y los niveles del embalse medidos.



Se digitalizaron las planillas de registro de nivel diario del embalse de La Angostura con esta serie y luego de aplicar un balance hídrico del embalse se determinaron los caudales diarios de ingreso al embalse estos fueron promediados a nivel mensual y la serie mensual es la utilizada para la calibración de la modelación hidrológica.

## 2. OBJETIVOS

Reconstruir la serie histórica de caudales de ingreso al embalse en los últimos 36 años, desde el 1980.

Determinar la oferta hídrica de la cuenca del Valle Alto empleando modelación hidrológica con la herramienta WEAP.

Hacer un balance hídrico del embalse para el periodo 2007-2016 para determinar los caudales de ingreso al embalse.

## 3. METODOLOGÍA

### a. Área de estudio

Para ese trabajo se realizó un análisis en la cuenca del Valle Alto, la cual abarca aproximadamente 1927 Km<sup>2</sup> (Figura 1). La cuenca del Valle Alto está en Cochabamba, Bolivia; el agua del embalse de La Angostura es utilizada en el Valle Bajo de Cochabamba.

### b. Balance hídrico del embalse

Para el análisis y procesamiento de los caudales de ingreso medidos se usó la siguiente metodología: Se calcularon los datos de volumen utilizando la batimetría realizada por el SENAMHI el 2013 (Figura 1). Estos ayudaron a la obtención de caudales, también se adecuaron las mediciones esto debido a que la diferencia entre la curva hipsométrica de 1990 y la curva hipsométrica del 2013 (SENAMHI, 2013), tiene una diferencia de 1 metro en las mediciones históricas, teniendo conocimiento que se realizaron las mediciones con la referencia de regla de 1990. Comparando con los datos históricos este presente mediciones negativas de hasta 30 cm el año 2003 (AUSNR N°1, 2003), de esta diferencia se concluye que la diferencia de un metro será corregida para ser usada en el presente estudio. Tomando en cuenta las series de caudales derivados para el sistema de riego número 1, el volumen de agua que precipita por día, y la evaporación del espejo de agua se calculó el volumen final por día luego del balance (ver la siguiente ecuación)

Una vez definido el volumen final y con el dato del volumen inicial de día siguiente se calcula el volumen de ingreso al embalse debido a escurrimiento de la cuenca propia. Los volúmenes de ingreso los convertimos en caudales y estos son promediados para encontrar los caudales mensuales de ingreso al embalse. Se tiene esta serie para el periodo 2007-2016.

Para el cálculo de la evaporación se consideró el área del espejo de agua. La siguiente ecuación es la utilizada para encontrar el volumen final del embalse luego del balance:

$$V_f = V_i + V_p - V_r - V_e$$

$V_{final}$  = Volumen final

$V_{inc}$  = Volumen inicial

$V_{prec}$  = Volumen de precipitación en el vaso

$V_{riego}$  = Volumen de riego

$V_{evpt}$  = Volumen de evaporación

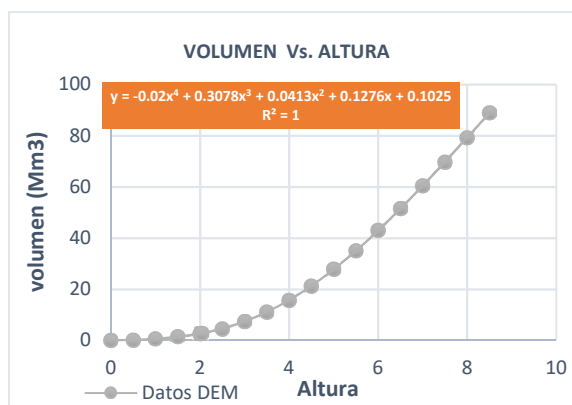


Figura 1. Curva hipsométrica (SENAMHI, 2013)

El Volumen diario de ingreso al embalse debido a la escorrentía (entendemos por escorrentía la suma del flujo superficial, flujo intermedio y flujo base) se calcula con la siguiente ecuación:

$$V_d = V_{i-s} - V_f$$

$V_{diario}$  = Volumen diario de ingreso al embalse

$V_{inc-Siguiente}$  = Volumen del día siguiente

$V_{final}$  = Volumen Final

### c. Modelación hidrológica

Para la modelación de los caudales se aplicó el software WEAP que comprende dos reservorios verticales. A través de esta asunción el flujo total se cuantifica mediante análisis del flujo superficial, las pérdidas por evaporación, la infiltración, la percolación y el flujo base. El esquema del modelo transmite la percolación profunda hacia un cuerpo de agua superficial o directamente hacia el acuífero subterráneo, de acuerdo a las características del sistema observado. La representación de los procesos hidrológicos tiene un nivel de agrupamiento que hace válida la aplicación del modelo dentro de una escala temporal mensual (CCGUC-SEI, 2009).

La introducción de datos al programa WEAP fue realizado con el modo de delineación de cuenca, el método de humedad del suelo es seleccionado para contabilizar las pérdidas, dentro la opción de demandas se incorporó la hipótesis de consumo en la parte alta de la cuenca. Los



datos de uso de suelo fueron tomados de la fuente libre de la agencia espacia europea que viene incorporada en el programa WEAP (Figura 2). Los datos de precipitación fueron obtenidos de la grilla meteorológica GMET producto del Balance Hídrico Nacional del 2017.

Luego de la implementación se inició con la calibración del modelo donde se vio que los datos observados y los simulados presentaron grandes variaciones, para que los caudales observados y simulados tengan una variación mínima y una buena eficiencia se calibraron los coeficientes y parámetros que de inicio se los tomo los aconsejados en

el balance hídrico de Bolivia (2017). Este proceso se realizó ajustando parámetros sensibles que determinaron la mejora, se hizo uso de la herramienta computacional CALITOOLS (Villazon, 2010), esta herramienta produce los parámetros estadísticos y las gráficas que permiten cuantificar en términos de eficiencia la variación de los parámetros. La Figura 3 muestra una pantalla del proceso de calibración de una de las corridas del modelo WEAP, donde en rojo caudal modelado y en azul los observados.

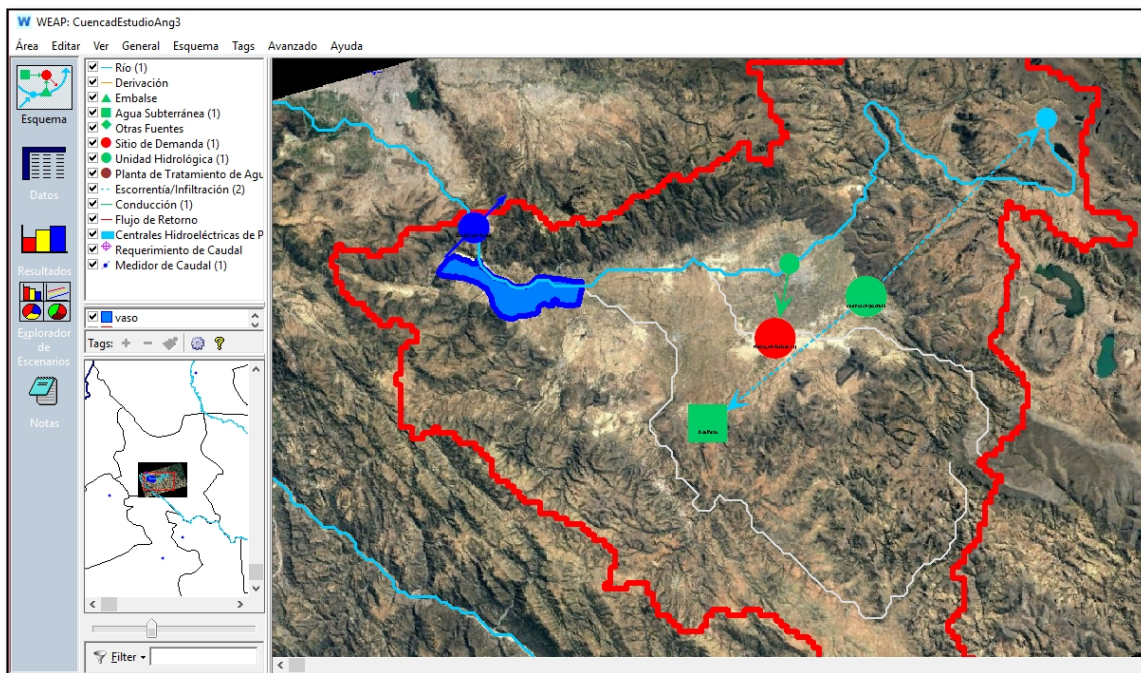


Figura 2. Delimitación de la cuenca del valle alto – imagen-WEAP

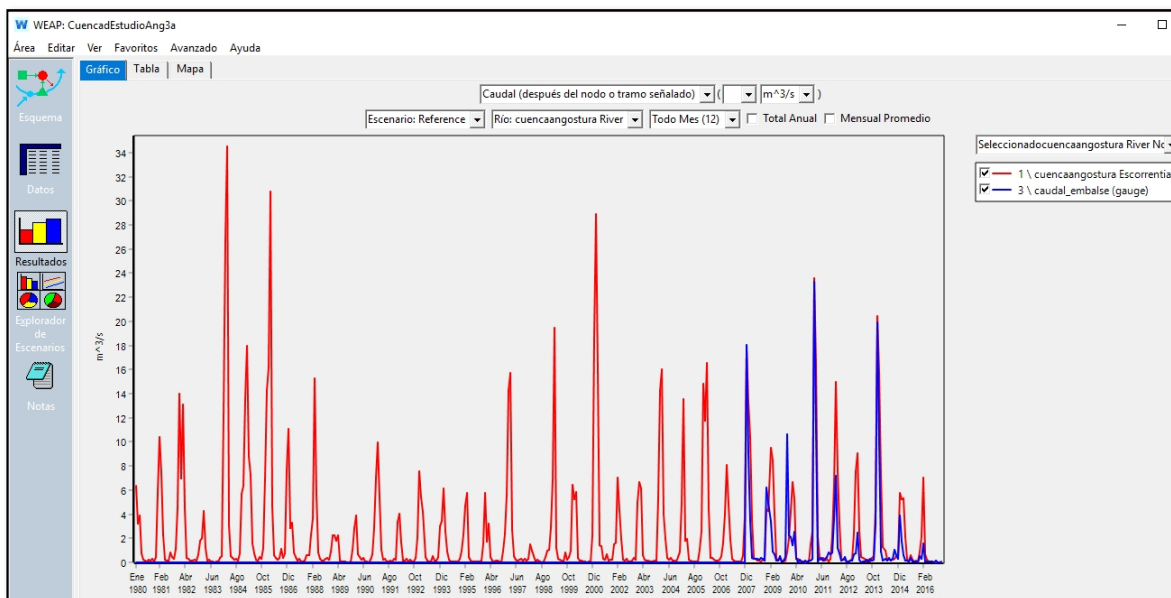


Figura 3. Resultado WEAP caudales de ingreso desde 1980



#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para este fin se realizó la calibración inicialmente analizando algunas anomalías y corrigiéndola, para la validación se realizó la calibración con el programa CALITools (Villazon, 2010), con la cual se logró optimizar hasta una eficiencia de  $EF = 0.506$ , escenario 2 de la Figura 5. Para el escenario 4 que es el que incluye la hipótesis de consumo de agua en la cuenca alta se logró mejorar la eficiencia a  $EF = 0.86$  este valor representaría una condición de muy buena según la Tabla 1.

**Tabla 1 Valores estadísticos recomendables (D. N. Moriasi, 2007)**

Clasificación de Rendimiento	EF
Muy bueno	$0.75 < EF \leq 1$
Bueno	$0.65 < EF \leq 0.75$
Satisfactorio	$0.5 < EF \leq 0.65$
insatisfactorio	$EF \leq 0.5$

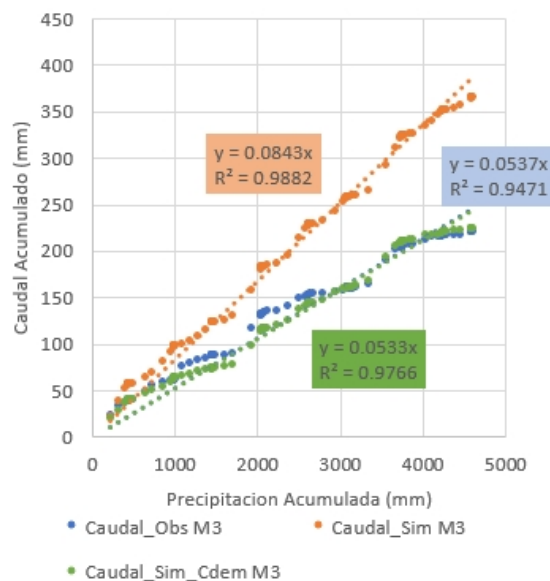
Este resultado fue logrado en función al análisis efectuado con los valores del modelo obtenido inicialmente, aplicando la hipótesis que se planteó en este trabajo sobre la demanda en la cuenca del valle alto. Esta hipótesis de consumo consiste en la variación del caudal en meses húmedos como demanda de riego que se tiene en las zonas altas y curso del río, las cuales afectan directamente el flujo base en estos meses de almacenamiento, teniendo como meses críticos y con sus respectivos caudales de variación los meses de Enero –  $2 \text{ m}^3/\text{s}$ , Febrero –  $5 \text{ m}^3/\text{s}$ , Marzo –  $5 \text{ m}^3/\text{s}$ , Abril –  $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$ . En estos meses también ocurre almacenamiento en atajado y/o pequeños reservorios en la cuenca, estos consumos son claros debido al incremento en obras de captación (presas, embalses, atajados y obras de captación para riego no estacional) para consumo agrícola y en algunos casos humano, con el fin de almacenar agua para meses de estiaje.

Se obtuvo el valor del coeficiente de escorrentía que es la relación de la precipitación total que ingresa a la cuenca con el volumen total de agua que sale de la misma los dos en milímetros, llegando a obtener un valor de 0.08 si el escenario de consumo y de 0.05 luego de aplicar el escenario de consumo planteado tal como se muestra en la Figura 4, el cual dista mucho de los valores en cuencas naturales no alteradas.

De acuerdo a la literatura que se tiene para este tipo de zonas se tiene valores como es el caso de las regiones del Ecuador con las mismas características de altura y terreno fluctuando valores entre 0.4 para cuencas inter andinas (Celleri R., 2007), de la misma manera valores de 0.49 para paramos interandinos (Buytaert W., 2004) y una valor de 0.36 en la cuenca Taquiña que para la presente investigación es la más próxima (Villazón, 2007). Esto demuestra que existe un uso intensivo aguas arriba que

impide que fluya el caudal total hacia la represa de La Angostura.

Corroborando este valor podemos ver que coincide con el valor de escurrimiento del Plan General de Riego del Valle Alto (SUBSEDAL-CORDECO, 1993), en este plan determinan el coeficiente de escurrimiento de 0.04 para la planicie del valle Alto la cual según el balance estaría siendo la que aporta en su totalidad al embalse y el restante es un aporte mínimo de las partes altas de la cuenca.



**Figura 4. Caudal medido acumulado Vs. Precipitación Acumulada en (mm)**

Se puede observar que por medio de la hipótesis existe una explotación del recurso en la cuenca y que la oferta hídrica corre riesgo a ser superada.

Podemos observar el modelo calibrado (Figura 5) el cual se aproxima al caudal observado con el escenario con demandas (4).

De la Figura 5 vemos que el caudal simulado tiene patrones de similitud en sus picos y en su ocurrencia con los observados, también podemos ver que en la Figura 6 el caudal acumulado se aproxima a los valores observado mostrando que el modelo presenta resultados aceptables.

La Figura 7 muestra la pantalla de WEAP con los volúmenes mensuales de agua que ingresa al embalse para el periodo 1980-2016 como producto de la simulación hidrológica.

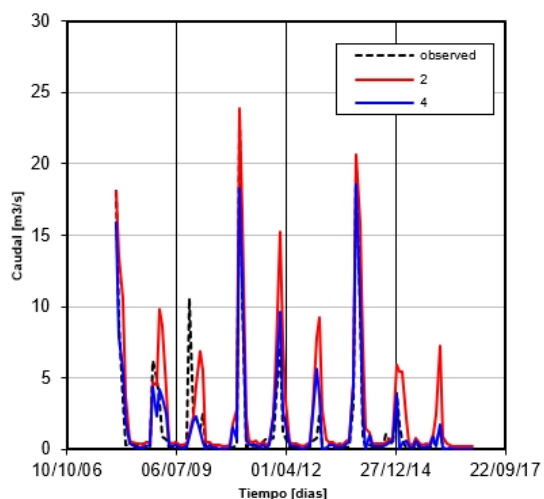


Figura 5. Series de tiempo de caudal observado, escenario 2 simulado sin hipótesis de demanda y escenario 4 simulado con hipótesis de demanda.

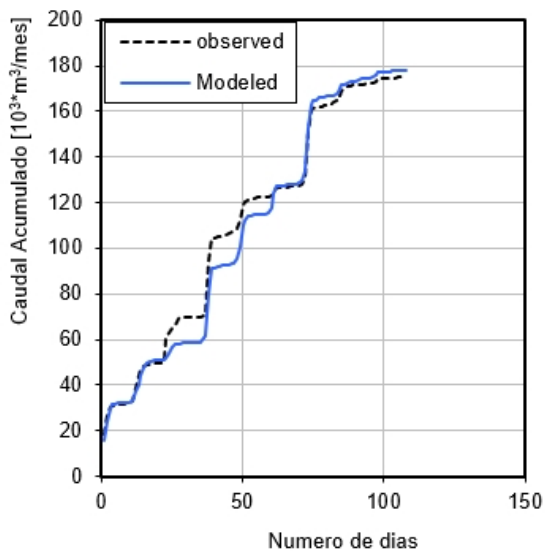


Figura 6. caudal calibrado acumulado en 10<sup>3</sup>\* m<sup>3</sup>/mes

## 5. CONCLUSIONES

El presente trabajo concluye que la reconstrucción de la serie de caudales de ingreso fue satisfactoria, ahora se cuenta con los volúmenes de ingreso al embalse desde el año 1980. Del balance hídrico realizado se muestra que la oferta hídrica es afectada en el tiempo (explotación) debido a que la hipótesis de demanda que se planteó en el presente estudio muestra valores destacados de consumo en la cuenca, los cuales alteran el ciclo hidrológico de la cuenca.

Analizando el plan de riego del valle alto del año 1993 se habrían planteado estrategias como los trasvases para mantener el crecimiento agrícola en la zona, actualmente por la no aplicación a políticas de gestión del agua nos encontramos camino a un déficit hídrico creciente en el embalse de la angostura.

El modelo calibrado puede servir para realizar análisis de escenarios de cambio climático y ver si incidencia en los volúmenes de ingreso al embalse.

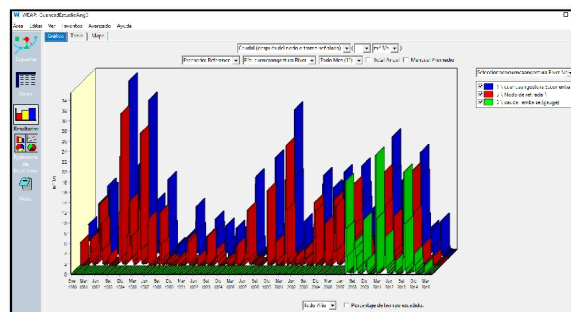


Figura 7. Resultado de volúmenes de ingreso al embalse

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Buytaert W., C. R. (2004). Comparison of the runoff ratio of cultivated and non-cultivated mountainous microcatchments in the Ecuadorian páramo. *International conference on the hydrology of mountain environments*. Berchtesgaden, Germany: KU Leuven.
- Celleri R., W. P. (2007). Hydrology of meso-scale basins of the Southern Ecuadorian Andes. *International Congress on Development, Environment and Natural Resources: Multi-level and Multi-scale Sustainability*. Cochabamba, Bolivia: KU Leuven.
- D. N. Moriasi, J. G. (2007). MODEL EVALUATION GUIDELINES FOR SYSTEMATIC QUANTIFICATION OF ACCURACY IN WATERSHED SIMULATIONS. American Society of Agricultural and Biological Engineers.
- SUBSEDAL-CORDECO. (1993). *Plan General de Riego del valle alto*. Cochabamba: CES-Consulting Engineers Salzgitter GmbH.
- Villazon, M. F. (2010). CALITOLS. Cochabamba, Bolivia.
- Villazón, M. V. (2007). Application of the WetSpa model to the Taquiña catchment with low quality data. *International Congress on Development, Environment and Natural Resources: Multi-level and multi-scale sustainability*. Cochabamba, Bolivia.: Laboratory of Hydraulics, Faculty of Science and Technology, Universidad Mayor de San Simón.