

# ARTÍCULO 6

# Calibración y Validación de un modelo Hidrológico mediante el WEAP método humedad del suelo, para la cuenca alta del Río Guadalquivir.

## Calibration and validation of a hydrological model using the soil moisture WEAP method for the upper basin of the Guadalquivir River

Lozano Velásquez Moisés Agustín<sup>1\*</sup>, Valeriano León Khalil<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ingeniero Civil, docente universitario carrera de Ingeniería Civil UAJMS.

<sup>2</sup>Trabajo de investigación realizado para obtener el título de Maestría en Recursos hídricos.

\* Correspondencia del autor(es): moicoml55@gmail.com

### Resumen:

Es importante el proceso de calibración y validación de un modelo hidrológico para la generación de escenarios alternos a corto mediano y largo plazo; y su posterior planificación en los recursos hídricos de una cuenca.

El objeto del presente estudio es generar un modelo hidrológico que debe la oferta y demanda de agua en la cuenca alta del río Guadalquivir, mediante la caracterización de datos climáticos, uso de suelos, demanda de agua, obras hidráulicas y sanitarias (embalse, planta de tratamiento).

Para obtener un modelo hidrológico en WEAP (plataforma del sistema para evaluación y planeación del agua) es necesario el proceso de calibración que consiste en comparar los caudales aforados o medidos con los caudales simulados e ir ajustando los parámetros del método humedad del suelo. Para determinar el grado de relación del modelo con el sistema físico real se utiliza las métricas de BIAS y NASH.

Los métodos empleados en la investigación son el deductivo, inductivo y analítico.

Los resultados de mayor relevancia obtenidos señalan que los aforos de los caudales mensuales en las estaciones hidrométricas requieren de un mayor tratamiento y análisis, siendo necesario un ajuste de los aforos, a pesar de ello en la cuenca se tiene la estación hidrométrica de obras que tiene

información fiable y con periodos largos que permiten la validación. Según la métrica de Nash (Nash y Sutcliffe, 1970) se logra un valor de 0.64 que indica que es un ajuste muy bueno y BIAS (Moriassi, et al., 2007) alcanza un 2% que sobrestima los caudales aforados. Los valores de las métricas de calibración y validación señalan que el modelo matemático simula el sistema físico real de la cuenca alta del río Guadalquivir.

### Abstract

The process of calibration and validation of a hydrological model is important for the generation of alternative scenarios in the short, medium and long term; and its subsequent planning in the water resources of a basin.

The purpose of this study is to generate a hydrological model that accounts for the supply and demand of water in the upper basin of the Guadalquivir river, through the characterization of climatic data, land use, water demand, hydraulic and sanitary works (reservoir, treatment).

To obtain a hydrological model in WEAP (system platform for water evaluation and planning), the calibration process is necessary, which consists of comparing the measured or gauged flows with the simulated flows and adjusting the parameters of the soil

moisture method. To determine the degree of relationship of the model with the real physical system, the BIAS and NASH metrics are used.

The methods used in the investigation are deductive, inductive and analytical.

The most relevant results obtained indicate that the gauging of the monthly flows in the hydro-metric stations require greater treatment and analysis, requiring an adjustment of the gauging, despite this in the basin there is the hydrometric station of obrasjes that has reliable information and with long periods that allow validation. According to the Nash metric (Nash and Sutcliffe, 1970), a value of 0.64 is achieved, which indicates that it is a very good fit and BIAS (Moriassi, et al., 2007) reaches 2%, which overestimates the measured flows. The values of the calibration and validation metrics indicate that the mathematical model simulates the real physical system of the upper Guadalquivir river basin.

**Palabras clave:**

Calibración, modelo, cuenca, métrica, calibración, WEAP.

**Keywords:** Calibration, model, basin, metric, calibration, WEAP.

**1. Introducción:**

La calidad de la calibración, por ende, la capacidad de predicción de un modelo depende enormemente en la calidad de los datos utilizados. ¿Cuánto de información es suficiente? Dependerá de la complejidad del modelo. ¿Cuántos años son suficientes para calibrar un modelo? Generalmente se buscará que los ciclos, periodos multianuales o etapas de la cuenca (ciclos naturales o con intervención humana) sean observables en los datos de calibración (Wagener, Wheeler, & Gupta, 2004).

Para la oferta de agua se debe realizar un análisis temporal en el periodo que se pretende calibrar y validar el modelo, procurando que las variables de uso de suelo como cobertura y textura correspondan o se aproximen a dicho periodo. En el

caso de la información climática debe ser analizada y verificada realizando pruebas de consistencia y homogeneidad. Para utilizar la información de la grilla climatológica en el modelo WEAP, se tiene que verificar que los datos de la grilla GMET sean próximos a los registrados en las estaciones, de tal manera, que la diferencia entre los registros pluviométricos y la información de la grilla meteorológica del BHSB sea mínima. En la herramienta de modelación WEAP la información climática y uso de suelo se comporta como variables de una función, en el caso de ser necesarios se puede ajustar la información climática mediante una ecuación de regresión, que relacione los datos de campo con la grilla.

El modelo hidrológico debe ser contextualizado en el periodo de calibración, es decir las variables climáticas, uso de suelo, demanda y obras hidráulicas corresponde al periodo de tiempo en el periodo de análisis, en caso contrario realizar una estimación según censos estudios y datos disponibles.

Para la caracterización del modelo SMM (soil moisture method), requiere información sobre capacidad de suelo en términos de infiltración y retención en los diferentes estratos representados por los contenedores de almacenamiento; estos parámetros han sido ajustados en base a indicadores (métricas) que verifique la representatividad de los valores asignados por medio de la comparación entre observaciones de campo y valores simulados.

Se calibra los parámetros de uso de suelo del método humedad del suelo, y procura iterar los parámetros hasta que los caudales simulados se aproximen a los caudales aforados; para verificar si la calibración es adecuada, se emplea el coeficiente de determinación y confiabilidad de predicción hidrológica Nash-Sutcliffe y BIAS.

Luego de la conceptualización de la oferta y demanda en el modelo WEAP (método humedad de suelo) en la cuenca alta del Río Guadalquivir. se procede a calibrar el modelo, mediante un proceso de tanteo se obtiene los valores de los parámetros de uso de suelo que minimicen la di-

ferencia entre los datos observados y simulados.

En la práctica la validación verifica si el modelo calibrado tiene un desempeño adecuado en referencia a la predicción de caudales. (Wagener, Wheeler, & Gupta, 2004)

El proceso de calibración debe ir acompañado de la validación del modelo hidrológico, para conocer el comportamiento del modelo en un periodo distinto al de calibración. Dicha validación corrobora si el modelo se está desempeñando de forma adecuada y simula la respuesta hídrica natural de la cuenca en el transcurso del tiempo. El proceso de validación es similar al de calibración cambiando los periodos de análisis, siendo uno anterior la calibración y posterior el de validación siempre que se cuente con un registro suficientemente extenso, para constatar la validación del modelo matemático se emplea las métricas de NASH y Bias.

La modelación hidrológica de cuencas hidrográficas se plantea como una herramienta para apoyar la toma de decisiones entorno a la gestión del agua. La modelación hidrológica suministra varias ventajas para la gestión del agua. (i) mejora el conocimiento del proceso a evaluar; (ii) sistematiza e incrementa la información ambiental de la cuenca; (iii) simula predicciones a corto, mediano y largo plazo; (iv) evalúa escenarios como alternativas de gestión; (v) estima la incertidumbre y el riesgo de la toma de decisiones. (Ruiz-Pérez, et al., 2016).

Al contar con un modelo bien calibrado que simule la respuesta hídrica, oferta y demanda de la cuenca, generan una serie de beneficios, permite emitir juicios en la toma de decisiones en la planificación, distribución de agua, uso sostenible del agua en la cuenca.

Entendiendo el uso sostenible del agua como aquel que mantiene la multifuncionalidad del recurso hídrico (Martínez y Esteve, 2004).

## 2. Materiales y Métodos

La investigación sigue el enfoque cuantitativo, porque se orienta en el análisis de datos y resultados, en el proceso se generaliza los resultados para explicar los fenómenos que suscitan en las variables climáticas y uso de suelos, demanda, respuesta hídrica en la cuenca alta del río Guadalquivir, empleando el modelo hidrológico WEAP.

Los métodos teóricos de investigación utilizados son análisis documental, deductivo, inductivo, analítico y modelación. Los métodos empíricos empleados son la observación y medición.

La muestra requerida es la información disponible para la oferta y demanda hídrica, en el caso de la oferta se precisa información de clima y uso de suelos para la conceptualización en el modelo WEAP. Las variables climáticas se obtienen de la grilla meteorológica GMET y para el uso de suelos el informe del ZONISIG, en el caso de la demanda se considera los requerimientos agrícolas de cada unidad hidrográfica según el censo agropecuario, el agua para consumo humano de los centros poblados de la cuenca, derivaciones, fuentes de agua, reservorios.

Para alcanzar las metas propuestas se desarrollan los siguientes pasos:

- ① Desarrollo del esquema y características básicas del modelo.
- ② Análisis documental, se busca información climática, uso de suelo, demanda de la zona alta de la cuenca del Río Guadalquivir, se recurre a diversas fuentes como: el SENAMHI, inventarios de fuentes hídricas e infraestructura de riego, proyectos en la zona de estudio, uso de suelos, datos climáticos, oferta y demanda hídrica de la cuenca.

- Se analiza la información recabada, a su vez se verifica si es consistente y fiable para trabajar.
- Una vez seleccionada la información se procede a ingresar los datos y conceptualizar el modelo teórico en WEAP, para el modelo base.
- Se calibra y valida el modelo hidrológico, comparando los caudales simulados con los caudales aforados.

### 3. Resultados.

A continuación, se expone parte de los resultados obtenidos en la investigación, disgregando en los siguientes apartados.

#### 3.1. Análisis y conceptualización de datos climáticos en el modelo WEAP.

El modelo hidrológico WEAP requiere de la caracterización de información climática como la precipitación, temperatura, humedad, viento, fracción de nubosidad y latitud. Los datos de mayor relevancia para cuantificar la oferta de agua en una cuenca son precipitación y temperatura. Debido a la proximidad numérica, consistencia con los datos tierra, distribución y densidad de estaciones en la zona de estudio se adopta la información climática de la grilla meteorológica del BHSB para el modelado en WEAP.

Procedimiento	Información requerida
Se hace clip derecho en la pantalla principal, y aparece tres opciones, entre ellas el modo delimitación de cuencas.	Grilla GMET de precipitación y temperatura.
Se ingresa a la opción cargar datos climáticos (clip en cargar datos climáticos)	
En el comando explorar se busca el archivo en formato net.cdf, en este caso se busca el archivo GMET.	

Tabla 1. Procedimiento para la conceptualización de precipitación y temperatura en WEAP.

#### CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE UN MODELO HIDROLÓGICO MEDIANTE EL WEAP MÉTODO HUMEDAD DEL SUELO, PARA LA CUENCA ALTA DEL RÍO GUADALQUIVIR

Debido a la escasa información de las variables humedad relativa, velocidad de viento y horas sol, se recurre a la información del ministerio que cuenta con grillas multianuales y mensuales de dichas variables que abarcan el territorio nacional.

Procedimiento	Información requerida
Con el QGIS se abre el archivo raster que contiene la información mensual de humedad relativa, velocidad del viento y fracción de nubosidad del periodo 1980 a 2016, se carga la información mensual numerada del 1 al 12 cada número representa información de cada mes (capa_añadir_capa raster).	Grillas de humedad relativa, velocidad del viento y fracción de nubosidad formato net.cdf. Delimitación de la cuenca en formato vector (WGS 84)
Se abre el archivo vector (WGS 84), que contenga la delimitación de cuenca, para tal efecto se exporta el shape de la delimitación de cuencas del WEAP, con el propósito que la información extraída coincida con el área de la cuenca (capa añadir_capa vector).	
Se exporta la información contenida en el raster, a las unidades hidrográficas. En el QGIS se dirige a caja de herramientas y procesos_Análisis ráster_Estadística Estadística de zona se carga la información de la capa ráster de cada mes. En “capa vectorial que contiene zonas” se selecciona la cuenca de análisis, y finalmente estadísticas a calcular. Se extrae la información requerida la “media de las variables climáticas”.	
Los valores medios mensuales de humedad relativa, velocidad de viento y fracción de nubosidad, se exporta al Shape de la cuenca, contenido en datos tabulados y ordenados.	
Con el ARCGIS se abre el archivo Shape con la información mensual adherida del QGIS, y se exporta la información tabulada en Excel formato csv. Para luego cargar dicha información.	

Tabla 2. Procedimiento para cargar los datos de humedad relativa, velocidad de viento, fracción de nubosidad en WEAP.

### 3.2. Análisis y conceptualización de datos de uso de suelos WEAP

Es importante mencionar que para la combinación cobertura vegetal y textura de suelo, presenta premisas relacionadas al método del número de curva (NC soil conservation service). El grupo hidrológico del suelo A, B, C y D se relaciona a la textura del suelo, que en ambos casos el parámetro señala la capacidad de infiltración. El uso de suelo de la tierra y cobertura del NC, se relaciona a la cobertura vegetal del WEAP.

Para conceptualizar la información al WEAP es necesario definir las leyendas de la combinación cobertura vegetal y textura del suelo, tomando como referencia las leyendas del balance hídrico nacional; para tal proceso se escribe primero el nombre de la cobertura y luego de la textura del terreno. Por ejemplo, si la cobertura vegetal es bosque y la textura del suelo es arcilla (CLAY=Y) primero se escribe el uso de suelo y luego la textura arcilla, queda la leyenda como Bosque\_Y.

Para caracterizar el uso de suelos se adopta la combinación empleada en el BHSB que es la combinación cobertura vegetal y textura; porque se cuenta con información como: tablas, rango de valores para los parámetros de suelo, guías y manuales. Los parámetros calibrados en el BHSB son útiles sirven de referencia y comparación en el proceso de calibración.

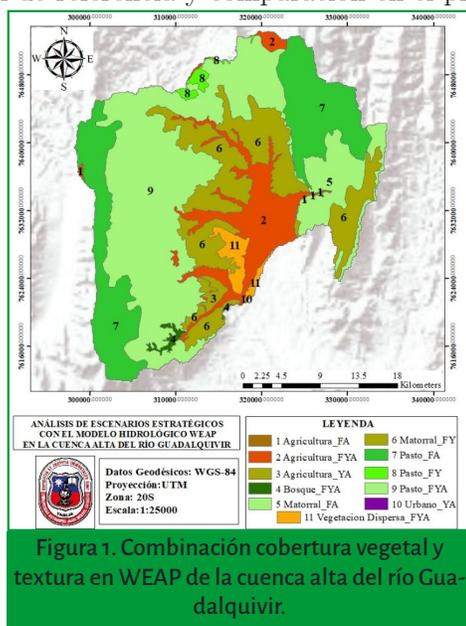


Figura 1. Combinación cobertura vegetal y textura en WEAP de la cuenca alta del río Guadalupe.

La figura 1, muestra un mapa de uso de suelos que detalla la leyenda de la combinación cobertura y textura para la cuenca alta del río Guadalupe.

La conceptualización de la combinación cobertura y textura en el modelo WEAP se detalla a continuación:

- ⦿ Proyección de PSAD56 ZONISIG a WGS84 [WEAP].
- ⦿ Cobertura vegetal se agrupa leyendas similares de manera que coincidan con la descripción BHSB.

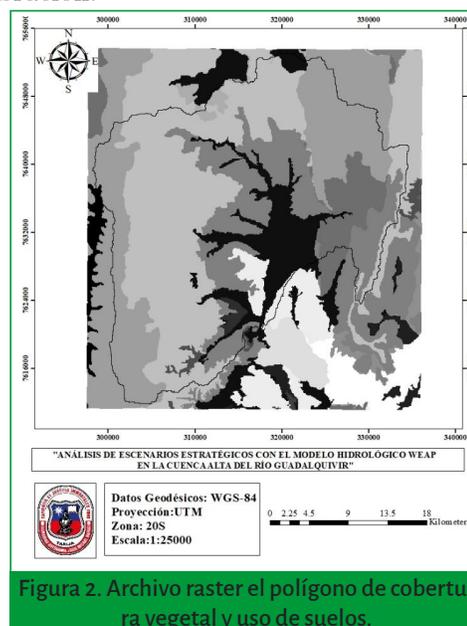
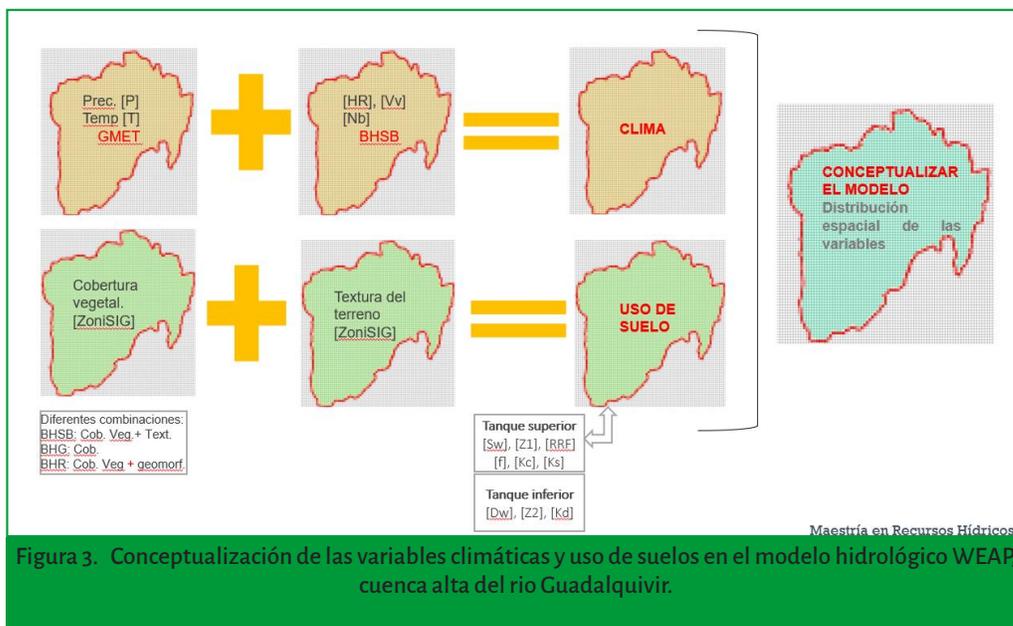


Figura 2. Archivo raster del polígono de cobertura vegetal y uso de suelos.

- ⦿ Se reclasifica la textura acorde a la capa superior y suelo predominante y se asigna la leyenda correspondiente (acrónimo).
- ⦿ Combinación cobertura vegetal y textura del terreno, mediante el geoprocésamiento de shapefile o bien mediante álgebra de mapas raster.
- ⦿ Conversión de archivo shape a netCDF (formulario de datos comunes en red), en QGIS resolución 3s (0.00083333333).

- Se enlaza el archivo netCDF con el WEAP, area.ini (siendo cuidadoso en los detalles).
- Caracteriza el netCDF, en el modelo en la opción Cobertura del suelo.



Cobertura vegetal generado		
Leyenda	Área en Argis (has)	Áreas eb WEAP (has)
Agricultura FA	175.1	176
Agricultura FYA	10046.7	10079
Agricultura YA	606.8	611
Bosque FYA	490.8	498
Matorral FA	5160.7	5204
Matorral FY	17840.3	17936
Pasto FA	19233.9	16977
Pasto FY	736.9	719
Pasto FYA	35890.4	36099
Urbano YA	9.8	14
Vegetación dispersa FYA	1818.6	1856

Tabla 3. Áreas de uso de suelo caracterizadas en WEAP.

### 3.3. Caracterización de la demanda histórica de agua, agrícola y poblacional.

Para el ingreso de la demanda agrícola al modelo WEAP, provee dos metodologías: mediante el ingreso de la demanda anual y la variación mensual o bien mediante la creación de unidades hidrográficas que emplea el método del coeficiente simplificada (Abro). (MMAyA, BHSB, 2016)

La cuantificación de la demanda de agua en cultivos a secano se realiza mediante el cálculo de la cantidad de agua perdida a través de la evapotranspiración (ETc, Penman Monteith). La ETc difie-

re conceptualmente, pero no en magnitud, de la necesidad de agua del cultivo, entendida como la cantidad de agua que necesita ser proporcionada al cultivo por riego o precipitación. El cálculo de la ETc sigue varios enfoques. (MMAyA, BHSB, 2016)

A partir de información de alta resolución espacial que permita identificar, digitalizar y cuantificar la superficie de las áreas de las parcelas (Soria, 2016), la situación deseable ocurre cuando es posible el relevamiento de las características de los cultivos en cada unidad, la identificación del tipo de uso (intensivo, extensivo, cultivos anuales y otros) para su asociación con parámetros de Kc y su variabilidad estacional.

**Demanda para riego.** A nivel de todas las HRUs definidas para representar la cuenca, se ha identificado áreas de cultivo en lo que se refiere a una diversidad de tipos de cultivos. Si bien el alcance de la investigación no llega a especificar un relevamiento de campo para hacer una identificación de cada tipo de cultivo en cada comunidad dentro de la cuenca, se realiza una simplificación de las demandas de riego acumulando las áreas de cultivo y empleando información del censo agrario 2013. Para afinar el estudio se debe realizar encuestas comunales, aforos de riego, inventariado de reportes, informes y documentos que caracterizan la producción agrícola en la cuenca.

Por esta razón, se ha realizado una recopilación de información para describir la producción agrícola en la zona. La demanda es representada a través de la estimación de evapotranspiración de los cultivos y las condiciones en las cuales esta es satisfecha considerando los sistemas de irrigación presentes, los mismos no son disgregados a detalle, sino agregados a nivel de HRUs, para poder ser validado una vez que se realice encuestas comunales.

Para la estimación de la demanda de agua potable en la cuenca alta del Río Guadalquivir, se considera como sitio de demanda el agua que es destinada para el municipio de San Lorenzo y las

obras de captación del Rincón de La Victoria y Erquis que derivan el caudal para un sector de ciudad de Tarija.

Si bien no existe un detalle de la información de consumo de agua en el Municipio de San Lorenzo, se cuenta con datos del censo poblacional (INE, 2013) que muestra la población y su dinámica de crecimiento en relación con los censos 1976, 1992, 2001 y 2012. La dotación es también un factor que se puede extraer de NB689. Considerando estas fuentes de información sobre los usos de agua potencial, es posible estimar la demanda a través de lineamiento de diseño establecidos en la normativa nacional.

Finalmente, con la conceptualización de todas las variables climáticas, uso de suelos y demanda de la cuenca alta del Río Guadalquivir. Para la representación gráfica del comportamiento de la cuenca para la oferta y demanda, es importante recorrer la cuenca y conocer las diferentes obras hidráulicas que la componen y características de la demanda.

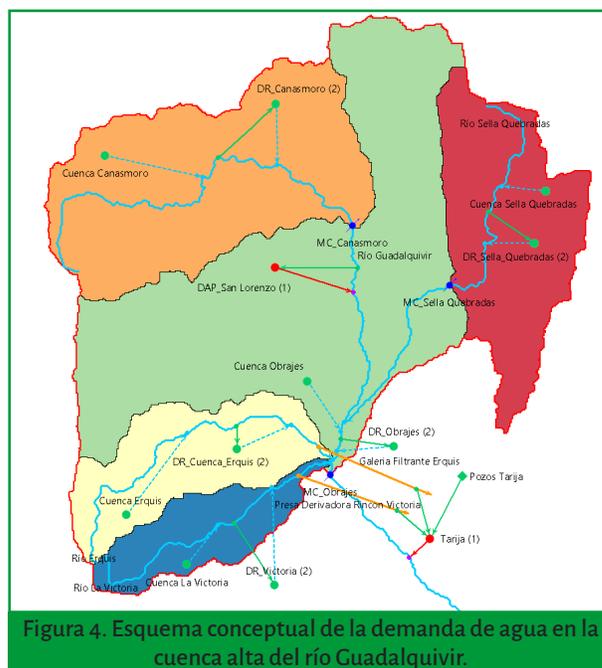


Figura 4. Esquema conceptual de la demanda de agua en la cuenca alta del río Guadalquivir.

### 3.4. Calibración del modelo hidrológico en la cuenca alta del río Guadalquivir.

La calidad de la calibración y la capacidad de predicción de un modelo hidrológico depende de la calidad de los datos, contexto y temporalidad de la información.

Mediante la conceptualización de las variables climáticas y demandas en WEAP en la cuenca alta del río Guadalquivir. El modelo hidrológico debe ser contextualizado al periodo de calibración, en lo posible contar con las demandas de agua potable y de riego en dicho periodo; una vez que logre calibrar el modelo se obtiene los valores de los parámetros de uso de suelo que minimicen la diferencia entre los datos observados y simulados, para verificar si la calibración es adecuada se emplea el coeficiente de determinación y confiabilidad de predicción hidrológica Nash-Sutcliffe y BIAS,

El área de la cuenca de Sella Quebradas es de 148 km<sup>2</sup> que representa un 16.4% de la superficie total de la cuenca alta del Río Guadalquivir. Al comparar los caudales medios máximos tanto de Obrajes como de Sella Quebradas se evidencia que son similares y en algunos casos lo superior lo cual no tiene sentido, debido que la estación de Obrajes contempla 6.1 veces el área de aporte que la estación de Sella Quebradas, por tal motivo se descarta dicha estación para el proceso de calibración, lo que se realiza en la cuenca de Sella Quebradas es un ajuste de los caudales época de estiaje, tal análisis de ilustra en la figura 5.

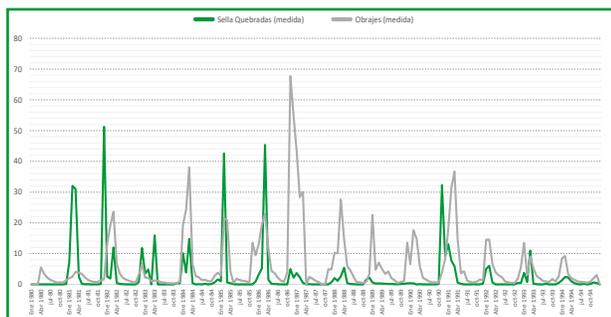


Figura 5. Comparación de caudales aforados en Sella Quebradas y Obrajes.

### CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE UN MODELO HIDROLÓGICO MEDIANTE EL WEAP MÉTODO HUMEDAD DEL SUELO, PARA LA CUENCA ALTA DEL RÍO GUADALQUIVIR

En cuanto a la estación de Canasmoro el registro de caudales aforados medios mensuales presentan un desplazamiento. Según los datos registrados los caudales máximos se presentan en época de estiaje por los meses de agosto y septiembre, dicho aspecto no refleja al comportamiento de la precipitación en la cuenca.

En el punto de aforo de obrajes se observa que los caudales medios máximos se presentan en la época de lluvia, y están acordes a los registros de precipitación, también presentan registros extensos y confiables y acorde al registro de precipitaciones mensuales, por tal motivo, se realiza la calibración en el periodo de 1980 y 1986 para el proceso de validación se considera los años desde 1987 al 1994.

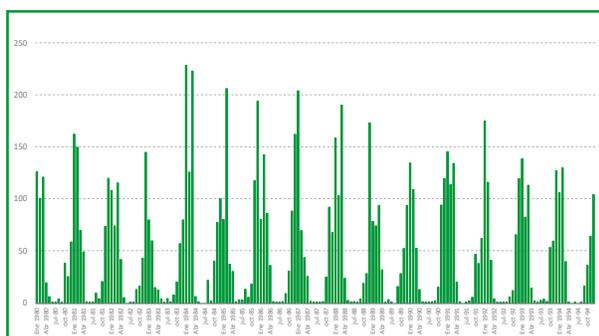


Figura 6. Registro de lluvias medias mensuales en la cuenca alta del río Guadalquivir.

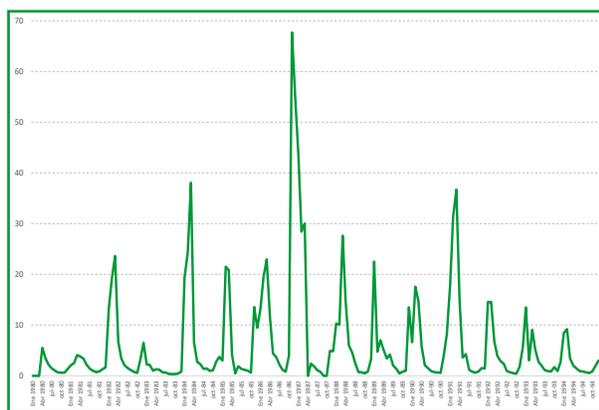


Figura 7. Registro de caudales medios mensuales en la cuenca alta del río Guadalquivir.

En las figuras 6 y 7, se evidencia un comportamiento estable que relaciona temporalmente la precipitación con respecto a los caudales medios aforados. La lluvia y caudal aforado muestran un patrón a precipitaciones máximas se produce caudales máximos y viceversa. Los caudales aforados son congruentes con las precipitaciones que se presentan en la cuenca de Obrajes

Se realiza un análisis del registro hidrométrico desde 1980 al 1994, en tal registro se aprecia que a finales del año 1986 y principios del 1987, se presenta un caudal pico que casi duplica los caudales registrados. Al comparar el caudal del año 1984 se registra un caudal de 38 m<sup>3</sup>/s en cambio el año 1986 se tiene un gasto de 68 m<sup>3</sup>/s, este fenómeno debe ir acompañado de precipitaciones extraordinarias proporcionales a los gastos. Al observar la tabla de precipitaciones se aprecia que el año que se presenta mayor precipitación es 1984, es decir el pico de los caudales deben ser próximos a dicho extremo. Una particularidad el caudal máximo de 1986 se presenta en el mes de noviembre que inicia el periodo húmedo; para generar tal pico de caudal mensual se debe recargar el tanque superior o saturar el suelo, o que las precipitaciones sean extremas para que se registre dicho caudal, por lo expuesto se descarta dichos aforos, del año 1986 y 1987.

La calibración y validación del modelo se desarrolla con los caudales aforados en Obrajes. Durante la fase de calibración se utilizó el 46.6% de la serie histórica de caudales observados (1980-1986). Al entender el método humedad de suelo de los dos contenedores y su ecuación facilita el tanteo y la asignación de valores en los parámetros de uso de suelo. Mediante ensayo y error, considerando los rangos de la guía de BHS (Soria, 2016) se realiza el ajuste manual de los parámetros, basado en la dinámica del modelo, la calidad de la información y la escala de los procesos naturales de la cuenca en estudio.

Una vez calibrado el modelo se procede a validar el mismo con el 46.6% de los datos de caudales observados restantes (1987 a 1994). Tanto la calibración como la validación son evaluadas con la métrica del coeficiente de determinación de Nash y BIAS, cuyo objetivo principal es establecer una correlación confiable entre los valores simulados y observados. El coeficiente determina la calidad del modelo para replicar los resultados medidos, y la proporción de variación de los resultados, que pueden explicarse por el modelo.

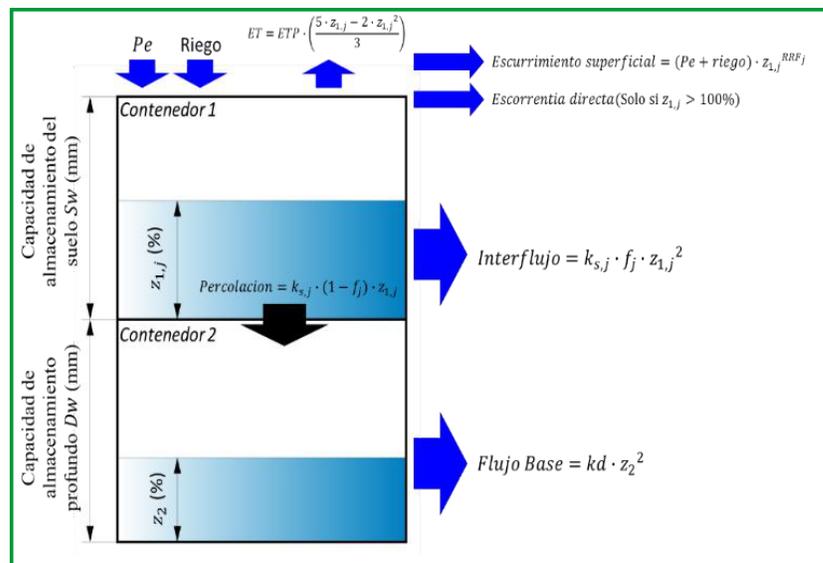


Figura 8. Elementos hidrológicos modelados en WEAP (método humedad del suelo).

### Ecuación balde superior

$$Sw_j \frac{dZ_{1,j}}{dt} = Pe(t) - ET_o(t) \cdot kc_j(t) \left( \frac{5Z_{1,j} - 2Z_{1,j}^2}{3} \right) - Pe(t) \cdot \frac{RRF}{Z_{1,j}^2} - f_j \cdot ks_j \cdot Z_{1,j}^2 - (1 - f_j) ks_j Z_{1,j}^2$$


Variable	Definición	Descripción WEAP
$k_{-}(c,j)$ (t)	Coficiente de cobertura vegetal en un suelo j.	Coficiente de cultivo.
$Sw_j$	Capacidad de almacenamiento en zona de raíces.	Capacidad de agua de suelo
$RRF_j$	Es el factor de resistencia de escurrimiento para cada fracción de cobertura	Factor de resistencia a la escorrentía
$Ks_{.j}(t)$	Estimación de la conductividad en la zona de raíces saturada (mm/paso de tiempo)	Conductividad en zona radicular.
$f_j$	Coficiente de partición o división relacionado al suelo, tipo de cobertura, y la topografía que fraccionan el agua en dos componentes, vertical y horizontal	Dirección preferencial del flujo
$Z_{1,j}$	Almacenamiento relativo dado como fracción del almacenamiento total en la zona de raíz (inicial).	Z1 inicial

Tabla 4. Definición de variables del balde superior y descripción en WEAP.

### Ecuación balde inferior

$$Dw \frac{dZ_{2,j}}{dt} = (1 - f_j) ks_j Z_{1,j}^2 - kd_{2,j} \cdot Z_{2,j}^2$$


Variable	Definición	Descripción WEAP
$Dw_j$	Capacidad de almacenamiento en zona profunda..	Capacidad agua profunda.
$kd$	Tasa de conductividad de almacenamiento inferior	Conductividad profunda
$Z_2$	Coficiente de partición o división relacionado al suelo, tipo de cobertura, y la topografía que fraccionan el agua en dos componentes, vertical y horizontal	Z2 inicial

Tabla 5. Definición de variables del balde inferior y descripción en WEAP

Para establecer el grado de correspondencia entre los valores modelados y observados, existen varios indicadores de carácter estadístico, como el índice de eficiencia de Nash-Surtcliffe y el sesgo de Bias.

$$Nash \rightarrow NC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{s,i} - Q_{o,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - \bar{Q}_o)^2} \quad \text{Ec. 3}$$

$$Bias = \frac{\bar{Q}_s - \bar{Q}_o}{\bar{Q}_o} \cdot 100 \quad \text{Ec. 4}$$

Donde:  $Q_{s,i}$ , caudal simulado en el paso de tiempo  $i$ ,  $Q_{o,i}$ , caudal observado en el paso de tiempo  $i$ ,  $\bar{Q}_o$ , promedio de los caudales observados,  $n, i$ , número total de pasos de tiempo,  $\bar{Q}_s$ , promedio de los caudales simulados,  $Q_o$ , promedio de los caudales observados.

NC	Ajuste
< 0.2	Insuficiente
0.2 a 0.4	Satisfactorio
0.4 a 0.6	Bueno
0.6 a 0.8	Muy bueno
> 0.8	Excelente

Tabla 6. Valores referenciales del criterio de Nash - Sutcliffe.

Entre menor el porcentaje de BIAS, mejor la correspondencia de datos observados y generados, un BIAS positivo indica sobre estimación y un BIAS negativo indica subestimación de los caudales.

En el proceso de calibración se compara los caudales mensuales aforados y simulados mediante un proceso iterativo en los parámetros de usos de suelo. En la etapa de calibración del modelo, se busca obtener los valores de las variables de los dos contenedores dentro del rangos establecidos que permitan simular los caudales aforados. Al comparar los caudales aforados con los medidos, es necesario conocer si el modelado es correcto y se acerca a la realidad, para ello se utiliza las métricas estadísticas NASH y Bias.

En el proceso de calibración, se aprecia el comportamiento de algunas variables, los caudales máximos se afectan primordialmente por el factor de resistencia a la escorrentía (RRF), la conductividad hidráulica en la zona de raíces (Ks) y la capacidad de retención de humedad en la capa superior del suelo (Dw). Cuando el valor de Dw se incrementa se logra un mayor flujo subsuperficial. Por otro lado, el flujo base es muy sensible a los parámetros: dirección preferencial de flujo (f) y la conductividad hidráulica en la zona profunda (Kd). Al aumentar el valor de f aumenta la conductividad en la zona profunda, y, por lo tanto, la descarga de perfiles profundos, y como consecuencia aumenta los caudales bases.

Si se busca aumentar la respuesta de caudales pico, se debe ajustar la escorrentía superficial la cual es afectada por el RRF y Ks, que afectan la reactividad de los catchments. Por otro lado, si se quiere afectar los caudales base se debe ajustar f y Kd. Las relaciones entre los diferentes términos de la ecuación no son lineales y por lo tanto al afectar un término, se afectan las demás variables de forma indirecta. Otro factor de calibración como la conductividad hidráulica de la zona profunda, Kd, puede ser incrementado, aumentando la conductividad, y por tanto la descarga de los perfiles profundos, y el consecuente aumento en los caudales base. Si se aumenta la capacidad hídrica del perfil superior, Sw, se logra un mayor flujo subsuperficial, y por tanto un aumento de los caudales máximos. Finalmente, para el parámetro de capacidad de retención de humedad en el perfil profundo Dw, regula la transmisión de los flujos a los caudales base (Guía metodológica MHRHMW, 2009).

Es importante calibrar el modelo manualmente para comprender el comportamiento y respuesta hídrica de la cuenca, respondiendo la pregunta ¿qué ocurre si hago variar tal parámetro en el modelo? La calibración se realiza de forma iterativa apreciando la variabilidad del caudal con respecto a la modificación de cada parámetro de uso de suelo. Después de varias iteraciones se logra precisar el valor correspondiente a cada parámetro.

En el proceso de calibración se debe considerar el comportamiento del flujo base, que debe tener un comportamiento cíclico, sin ninguna tendencia. Con todas las consideraciones expuestas se llega a un mejor ajuste, y replicar las mediciones de caudales mensuales. En la figura 8, se muestra los resultados finales de calibración en el periodo mayo de 1980 a octubre de 1986.

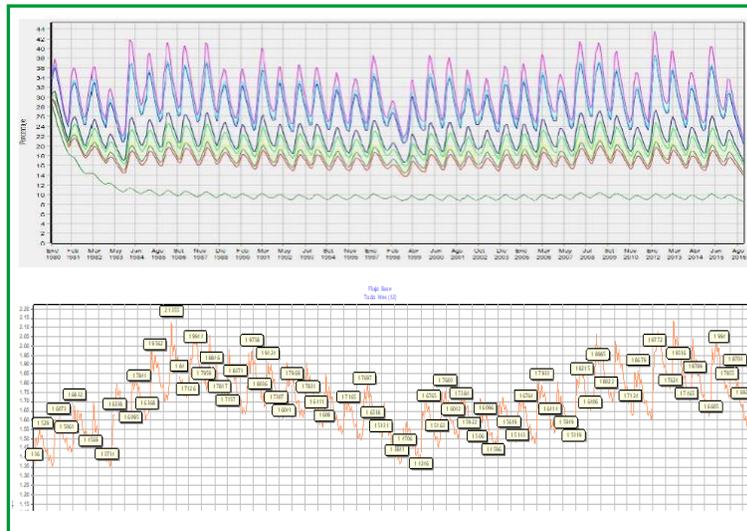


Figura 9. Flujo base en la cuenca alta del río Guadalquivir.

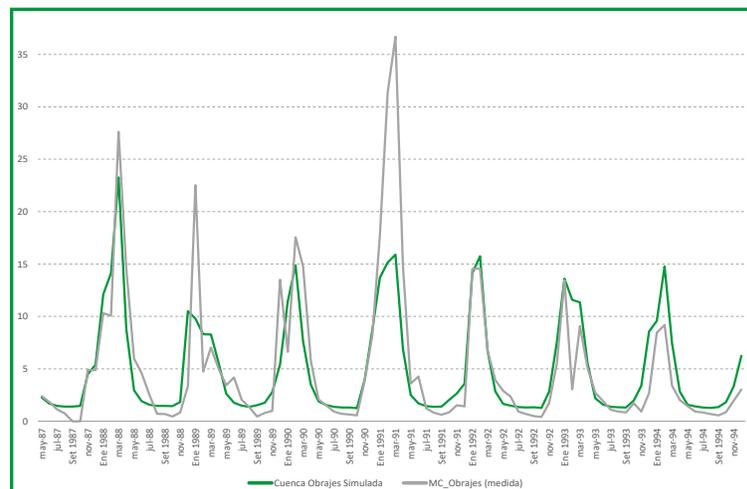


Figura 10. Hidrograma de caudales aforados y caudales simulados calibrados

Medidas de bondad de ajuste	Fórmulas	Valor obtenido
Nash- Sutcliffe	$NC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{s,i} - Q_{o,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - \bar{Q}_o)^2}$	0.64 Ajuste Muy bueno
Bias	$Bias = \frac{\bar{Q}_s - \bar{Q}_o}{\bar{Q}_o} \cdot 100$	2% Sobre estimación

Tabla 7. Medidas de bondad de ajuste para el modelo calibrado.

Los resultados obtenidos en el proceso de calibración, tanto el coeficiente de NASH como es sesgo de BIAS, presentan valores aceptables.

### 3.5. Validación del modelo hidrológico en la cuenca alta del río Guadalquivir.

En la práctica la validación verifica si el modelo calibrado tiene un desempeño adecuado en referencia a la predicción de caudales. Se aplica considerando datos de un periodo distinto al utilizado durante la calibración.

En el proceso de validación se debe contar con un registro lo suficientemente extenso; para tal propósito lo ideal es calibrar con un periodo inicial y validar con las últimas mediciones registradas, En la estación hidrométrica de Obrajes se tiene un registro de caudales que se extiende para el periodo de 1980 a 1994, En la presente investigación se considera el intervalo de validez desde el año 1987 a 1994.

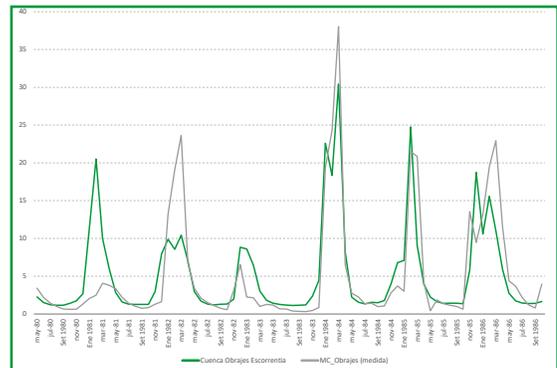


Figura 11. Hidrograma de caudales aforados caudales simulados periodo de validación.

Medidas de bondad de ajuste	Fórmulas	Valor obtenido
Nash-Sutcliffe	$NC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{s,i} - Q_{o,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - \bar{Q}_o)^2}$	0.66 Ajuste muy bueno
Bias	$Bias = \frac{Q_s - \bar{Q}_o}{\bar{Q}_o} \cdot 100$	-4% Sub estimación

Tabla 8. Medidas de bondad de ajuste para el modelo calibrado.

Para el proceso de validación se elige el periodo que corresponde al intervalo de 1987 a 1994; de la serie de histórica de caudales mensuales de la estación hidrométrica de obrajes, se evidencia que, para dicho periodo, se obtienen mejores métricas, estos resultados muestran que el modelo es capaz de representar la dinámica hidrológica de la cuenca, generar escenarios alternos y posibilita la planificación de recursos hídricos en la cuenca alta del río Guadalquivir.

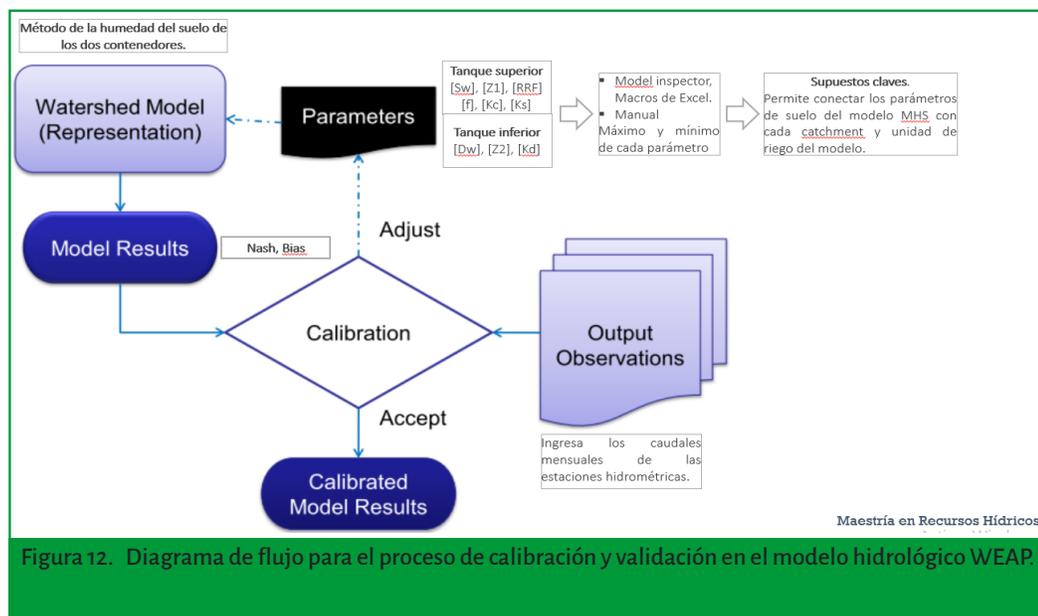


Figura 12. Diagrama de flujo para el proceso de calibración y validación en el modelo hidrológico WEAP.

Parámetro	Incidencia con el flujo superficial	Valor adoptado
Kc: Coeficiente de cobertura [-]	El <b>kc</b> afecta a la evapotranspiración potencial se elige un coeficiente que represente a la unidad hidrográfica, cuando se eleva el <b>kc</b> el caudal simulado se reduce. El rango empleado por el balance hídrico nacional oscila entre 1.0 a 1.2.	Kc_Bosque=0.92
		Kc_Matorral=0.87
		Kc_Pastos=0.83
		Kc_Agricultura=0.68
		Kc_Vegetación dispersa=0.68
		Kc_Urbano=0.68
f: Dirección preferente del flujo [-].	El <b>f</b> incide en el interflujo o flujo subsuperficial en la zona de raíces, al aumentar el valor de <b>f</b> existe un incremento en el escurrimiento superficial. <b>f</b> indica la cantidad de agua que ingresa al contendor inferior por medio de la percolación; cuando este valor es 0 indica que el flujo es vertical, cuando el valor es 1 señala que el flujo es horizontal y que no existe aporte al contendor inferior. El balance hídrico nacional cuenca de la plata toma un valor entre 0.72 a 0.99.	F_Bosque=0.94
		F_Matorral=0.94
		F_Pasto=0.68
		F_Agricultura=0.53
		F_Vegetación_dispersa=0.94
		F_Urbano=0.94
Sw: Capacidad de almacenamiento de agua en zona de raíces [mm]	<b>Sw</b> es un parámetro que depende de la textura, la profundidad de la zona de raíces que se relaciona con el tipo de cobertura vegetal presente; este valor se ajusta por medio de un factor regional. Es importante señalar que el balance hídrico muestra un factor regional $F_{sw}$ de 1.1; para el presente trabajo se adopta un valor de 1.16.	Agricultura_FA=144
		Agricultura_FYA=156
		Matorral_FA=144
		Matorral_FY=144
		Pasto_FA=144
		Pasto_FY=144
		Pasto_FYA=156
		Urbano_YA=10.8
Vegetación Dispersa_FYA=156		
Ks: Conductividad de la zona de raíces [mm/mes].	<b>Ks</b> incide en el interflujo al elevar dicho valor se reduce es escurrimiento superficial. El parámetro influye en la percolación al aumentar el ingreso de agua en el balde inferior. En el proceso de calibración se obtiene un factor regional igual a $F_{ks}$ 2.8, en el balance hídrico nacional es 4.	Arcilla=34.56
		Arcilla arenosa=72.58
		Franco arcilloso=51.84
		Franco arenoso=573.70
		Franco arcilloso arenoso=155.52
RRF: Factor de resistencia a la escorrentía [-]	El <b>RRF</b> afecta el escurrimiento superficial y el interflujo del modelo al elevar dicho valor se incrementa el caudal en el punto de aforo, los valores de dicho factor se adoptan de la tabla 14, este parámetro mantiene según las tablas y valores recomendados en la bibliografía.	Agricultura=4.8
		Bosque=7.23
		Matorral=4.8
		Pasto=5.41
		Vegetación Dispersa=4.80
Z <sub>1</sub> : Nivel de humedad en la zona de raíces [%].	<b>Z<sub>1</sub></b> , la fracción inicial de almacenamiento en la zona de raíces se obtiene mediante un proceso iterativo de ensayo y error. Una vez que ajustado <b>Kc, f, Sw, Ks, RRF</b> , se dirige a resultados humedad relativa del suelo (1%), y se obtiene el valor promedio de <b>Z<sub>1</sub></b> para todas las combinaciones cobertura textura, como valor representativo se obtiene el promedio del mes inicial. En el balance hídrico nacional <b>Z<sub>1</sub></b> =40%, en el estudio se obtiene <b>Z<sub>1</sub></b> =43%.	35%
Kd: Conductividad profunda [mm/mes].	<b>Kd</b> se obtiene en el proceso de calibración, este parámetro incide en el flujo base, e interflujo al disminuir el valor reduce el escurrimiento en época de estiaje, es importante el valor para ajustar el modelo; en el balance hídrico nacional este parámetro se encuentra entre 5 y 20. En el presente estudio se llega a un valor de 15.	22%
Dw: Capacidad agua profunda [mm].	<b>Dw</b> , es un parámetro que se debe calibrar y se encuentra en la parte inferior del balde, en el balance hídrico nacional adopta el valor de 1200, el estudio se adopta el mismo valor.	1100
Z <sub>2</sub> : Nivel de humedad en la zona profunda [%].	Al igual que el parámetro <b>Z<sub>1</sub></b> se obtiene el porcentaje de <b>Z<sub>2</sub></b> mediante un proceso iterativo. Este es un aspecto interesante, su comportamiento debe ser cíclico aumentar en época de lluvia y disminuir en época de estiaje, sin seguir tendencia alguna, se obtiene al promediar los diversos valores obtenidos del mes inicial <b>Z<sub>2</sub></b> . En el balance hídrico nacional adopta el valor de 40%, en el estudio se obtiene un 43%.	42%

Tabla 9. Parámetros de uso de suelos obtenidos mediante el proceso de calibración para la cuenca alta del río Guadalquivir método humedad se suelo SMM.

## 4. Discusión

El proceso de calibración se realiza de forma manual para conocer el comportamiento de los parámetros del tanque superior e inferior, método humedad de suelo. De esta forma, dependiendo de la serie de caudales que se requiera mejorar, se debe ajustar el o los parámetros correspondientes. Una vez se han ajustado los factores de calibración necesarios, se realiza la comparación de los caudales modelados con los registros históricos de estaciones de aforo de caudales de la zona. Para establecer el grado de correspondencia entre los valores observados y los valores modelados utilizan el índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe y el sesgo Bias (Weglarczyk, 1988. CCGUC, 2009).

Para lograr un modelo que simule el comportamiento hidrológico de una cuenca, se debe replicar los fenómenos climáticos presentes en un periodo dado, y reflejar la cobertura, características del suelo presentes en la superficie y demanda.

El proceso de calibración depende del registro hidrométrico, se hace variar los parámetros de uso de suelos, para que el caudal simulado se aproxime al caudal medido. Es decir, si se cuenta aforos erróneos los parámetros del tanque superior e inferior del método humedad del suelo, se alejan de la realidad, simulando otra unidad hidrográfica. Se debe analizar, comparar, verificar, corregir los caudales mensuales generados por las estaciones hidrométricas.

Alternativamente, la hidrología moderna amplía este procedimiento a través de enfoques jerárquicos similares al proceso siguiente (Wagener, Wheeler, & Gupta, 2004):

- ⊙ Se analiza la validez del modelo a través de la prueba tradicional de dos muestras.
- ⊙ Se valida estas percepciones en cuencas vecinas hidrológicamente similares.
- ⊙ Se selecciona dos periodos distintos a los previamente identificados. El requisito es identificar periodos donde se espera que el comportamiento de la cuenca hubiese cambiado o evolucionado por efectos varios, de preferencia naturales. En este paso, es posible que los parámetros calibrados cambien, debido a que se busca evaluar el desempeño del modelo en condiciones distintas.

En el proceso de validación, se obtiene métricas aceptables; el coeficiente de NASH alcanza un porcentaje 0.66 según su escala el valor se encuentra en el rango de “muy bueno”; en cambio para el sesgo de BIAS se subestima con un porcentaje del -6%.

## 5. Bibliografía

- 📖 Andersen L. Y Mamani R. (2009). Cambio Climático en Bolivia hasta 2100: Síntesis de Costos y Oportunidades. Estudio Regional de Economía del Cambio Climático en Sudamérica.
- 📖 Cabrera, j. (2011). Calibración de modelos Hidrológicos. Universidad Nacional de Ingeniería de Perú.
- 📖 Calderón A. Paula A. (2017). Análisis de disponibilidad de recurso hídrico en la cuenca del Río Virilla (tesis de maestría). Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- 📖 CITER, (2007). Programa de Aprovechamiento de los Recursos Hídricos del Departamento de Tarija. OTN-PB.
- 📖 Coponariño (2009). Índice de escasez de agua superficial cuenca Río pasto, Bogotá, Colombia.

- Dirección de conservación y planeamiento de recursos hídricos, (2010). Evaluación de recursos hídricos superficiales en la cuenca del Río Pampas. Ministerio de Agricultura de Perú.
- Duque Y. y Vázquez Zambrano R. (marzo de 2015). Modelación de la oferta hídrica en una cuenca de montaña tropical en función de su cobertura del suelo. *Aqua-LAC*, (7), 53-76. Recuperado de <http://www.unesco.org/>
- Escobar, M., Lima, N., Purkey D., Yates David. y Forni Laura. (septiembre de 2013). Modelación Hidrológica y Escenarios de Cambio Climático en Cuencas de Suministro de Agua de las ciudades La Paz y El Alto, Bolivia. *Aqua-LAC*, (5), 23-34. Recuperado de <http://www.unesco.org/>
- ESCOBAR, PURKEY, POUGET, SUAREZ, CONDOM Y RAMOS, (2008). Construcción del Modelo WEAP del Río Santa. IRD, SEI-US. Díaz Barriga, F. (2011). Taller de metodología de la investigación para Educación Superior. Editorial Limusa. México.
- Ezequiel Ander EGG. (2011). Aprender A Investigar Nociones Básicas Para La Investigación Social. Editorial Brujas. Argentina.
- Food and Agricultura Organization (2006). Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos.
- Fundación amigos de la naturaleza. (2010). Disponibilidad hídrica y demanda de agua en la cuenca Piraí: Situación actual y escenario de cambio climático con aplicación de SWAT Y WEAP. Recuperado de <http://www.fan-bo.org/>
- CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE UN MODELO HIDROLÓGICO MEDIANTE EL WEAP MÉTODO HUMEDAD DEL SUELO, PARA LA CUENCA ALTA DEL RÍO GUADALQUIVIR
- Guevara Castro Daniel Fernando. (2015). Propuesta para determinar la oferta hídrica neta de una cuenca contemplando escenarios extremos: caso de estudio microcuenca del Río Upín (tesis de maestría). Universidad Católica, Bogotá, Colombia.
- Hervis, G., Lopez, T., Vargas, R., Rolón, J. y Sanchez, G. (2018). Aplicación del modelo WEAP para la planeación hidrológica de la cuenca San Diego, Pinar del Río, Cuba. Recuperado de <http://www.researchgate.net/publication/320776369>.
- Instituto de Hidráulica e Hidrología. (2005). Balance hídrico superficial de la cuenca alta del Río Pilcomayo. La Paz, Bolivia.
- Instituto Nacional de Estadística (diciembre, 2013). Censo Agropecuario. La Paz, Bolivia.
- Instituto Nacional de Estadística (febrero 2015). Censo de población y vivienda 2012. La Paz, Bolivia.
- Juan C., (2011). Calibración de modelos Hidrológicos. Universidad Nacional de Ingeniería.
- Labrador A., Zuñiga J. y Romero J. (2016). Desarrollo de un modelo para la planificación integral del recurso hídrico en la cuenca hidrográfica del Río Aipe. *Revista Ingeniería y Región*, 15 (1), 23-35. doi: <https://doi.org/10.25054/22161325.1176>
- Leodán A. O., Guillermo V. y Guillermo B. (2007). Estimación de la oferta hídrica con información escasa en ecosistemas estratégicos. *Revista Facultativa Agronómica*, Medellín, Colombia.
- Menacho León Juan Williams (2017). Estudio de balance hídrico con modela-

miento WEAP en la cuenca Alta del Río Pativilca. Asegurando el Agua y los Medios de Vida en la Montaña, Chiquian, Bolognesi, Perú.

- 📖 Nicolás Ciancaglini, Guía para la determinación de textura de suelos por método organoléptico.
- 📖 Norma Lili Castro Giraldo. (2014). Implementación del sistema de modelación WEAP como herramienta para la gestión integral del recurso hídrico en la vereda la bella (tesis de grado). Universidad Tecnológica Pereira, Pereira, Colombia.
- 📖 Parra Ullauri Alejandra Mayra. (2016). Implementar el sistema de modelación WEAP como herramienta que determine el impacto del cambio climático sobre la disponibilidad del agua en la cuenca del Río Machángara (tesis de grado). Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador.
- 📖 Plan Nacional de Regadíos (2008).
- 📖 Ruiz, L., Delgado, J., Cortés, M., y Rueda, O. (marzo de 2015). Efecto de medidas de adaptación basada en ecosistemas sobre métricas hidrológicas considerando cambio climático: Río Nechí. Aqua-LAC, (8), 21-33. Recuperado de <http://www.unesco.org/>
- 📖 Senamhi (2011). Cartilla técnica Ciclo hidrológico. Lima, Perú.
- 📖 Servicio Nacional de Estudios Territoriales. (2005). Balance hídrico integrado y dinámico en el Salvador. San Salvador.