

ARTÍCULO 6

Recibido: 30/7/2022
Aprobado: 18/3/2022

Análisis de escenario futuro con déficit hídrico con el modelo hidrológico Weap en la cuenca alta del Río Guadalquivir

Future scenario analysis with water deficit with the Weap hydrological model in the upper basin of the Guadalquivir River

Moisés Agustín Lozano Velásquez ¹, Khalil Valeriano León ²

¹ Ingeniero Civil, docente universitario carrera de Ingeniería Civil UAJMS.

Correspondencia del autor(es): moicoml55@gmail.com¹.

Resumen

En el presente estudio se genera 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.

Al contar con un modelo calibrado, se puede generar escenarios alternos y alcanzar el objetivo propuesto, que es proponer estrategias o planes que optimicen el aprovechamiento hídrico de la cuenca alta del río Guadalquivir con el modelo WEAP en base a escenarios futuros situación extrema periodo seco.

El enfoque de investigación es cuantitativo, el tipo de investigación según profundidad es propositiva, los métodos teóricos empleados son el análisis documental, modelación y causal, en cuanto al método empírico se utiliza la observación y medición.

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. Los escenarios alteros deben proyectar un com-

portamiento semejante al de análisis mediante la información actual. A partir del índice de escasez se establece dos líneas de acción que compensen los efectos de una situación extrema, como la gestión de riego, gestión de cuencas.

Palabras clave: Calibración, modelo, cuenca, métrica, calibración, escenarios, planes, WEAP.

Abstract

In the present study, a hydrological model is generated 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 plant).

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.

By having a calibrated model, alternative scenarios can be generated and the proposed objective achieved, which is to propose strategies or plans that optimize water use in the upper basin of the Guadalquivir River with the WEAP model based on future scenarios in an extreme dry period situation.

The research approach is quantitative, the type of research according to depth is propositional, the theoretical methods used are documentary analysis, modeling and causal, as for the empirical method, observation and measurement are used.

The most relevant results obtained indicate that the gauging of the monthly flows in the hydrometric stations require greater treatment and analysis. The alternative scenarios must project a behavior similar to that of the analysis using the current information. Based on the scarcity index, two lines of action are established to compensate for the effects of an extreme situation, such as irrigation management, basin management.

Keywords: Calibration, model, basin, metric, calibration, scenarios, plans, WEAP.

1. Introducción

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.

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

Para proyectar escenarios alternos es necesario analizar su comportamiento futuro, considerando factores que pueden alterar la respuesta hídrica de la cuenca, pudiendo ser obras de gran magnitud como presas y sistemas de riego, cambio climático, deforestación. En el caso específico del estudio se considera un escenario de déficit hídrico en condiciones secas.

La proyección de los caudales mensuales de la cuenca alta del río Guadalquivir se emplea la proyección de precipitación y temperatura que

propone el BHSB (MPI-ESM-MR), las variables climáticas de humedad relativa, velocidad del viento y nubosidad se mantienen cíclicas hasta el periodo proyectado, en cuanto a la combinación de cobertura vegetal y textura se mantiene constante.

Para analizar las situaciones críticas secas, se estima el índice de escasez correspondiente a la relación porcentual entra la demanda y oferta de agua, se analiza el menor gasto de la serie histórica proyectada.

La importancia de la cuenca hidrográfica como unidad de planificación y gestión es dada por ser una unidad geográfica natural con condiciones muy específicas y propias, como son: independencia relativa, límites naturales bien definidos y una dinámica funcional determinada por el intercambio de energía y materia (Drake y Hogan 2013; World Vision 2014). Así, esta proporciona servicios ecosistémicos y disponibilidad de agua dulce, necesarias para el desarrollo de la vida en el planeta y de los sistemas productivos (BID 2012, GWP 2009).

Por medio de la entrevista a expertos, análisis documental sobre la planificación de recursos hídricos, se establece planes y estrategias viables que coadyuven a reducir el impacto del cambio climático. Las líneas de acción propuestas son la gestión de riego: gestión de proyectos de aprovechamiento hídrico, monitoreo del régimen hidroclimático, gestión de cuencas: mejoramiento de la calidad de agua, resiliencia de los sistemas de vida de valles y montañas.

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.

El tipo de investigación según profundidad es propositivo, porque al realizar un análisis profundo de un escenario futuro crítico periodo seco, se plantea una propuesta para mitigar los efectos del cambio climático mediante la gestión de riego y gestión de cuenca, mejorando la situación inicial.

Los métodos teóricos de investigación utilizados son análisis documental, modelación y causal. 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 agrarios 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:

- ⊙ Desarrollo del esquema y características básicas del modelo.
- ⊙ 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.
- ⦿ Proyección de precipitación y temperatura para periodo condiciones secas propone el BHSB (MPI-ESM-MR).
- ⦿ Generar escenarios futuros en base a una situación de escasas hídrica periodo seco.
- ⦿ Propuesta de planes estratégico que mejoren el aprovechamiento hídrico de la cuenca.

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 clic 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 (clic 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.

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
<p>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).</p>	
<p>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).</p>	
<p>Se exporta la información contenida en el raster, a las unidades hidrográficas.</p> <p>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.</p> <p>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”.</p>	<p>Grillas de humedad relativa, velocidad del viento y fracción de nubosidad formato net.cdf.</p> <p>Delimitación de la cuenca en formato vector (WGS 84)</p>
<p>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.</p> <p>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.</p>	

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

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 superficial de Bolivia que es la combinación de cobertura vegetal y textura, debido que se tiene información; 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.

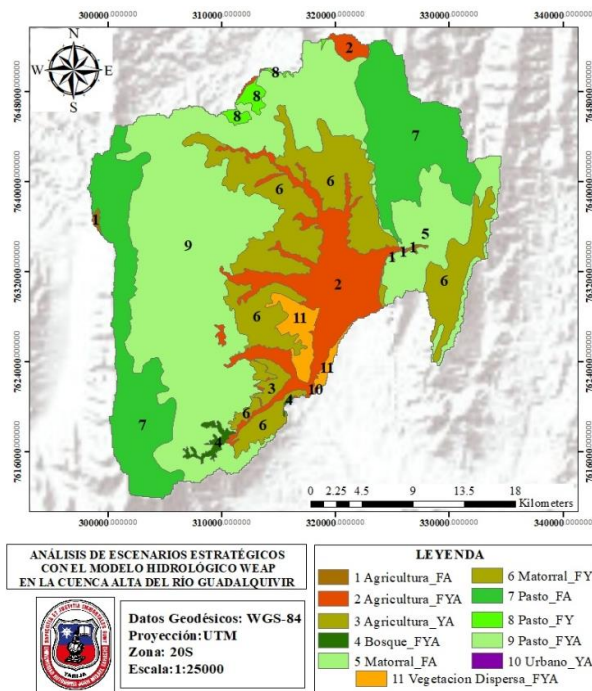


Figura 1. Combinación cobertura vegetal y textura en WEAP de la cuenca alta del río Guadalquivir.

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 Guadalquivir.

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.
- ◉ 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 (0.000833333333).
- ◉ 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.

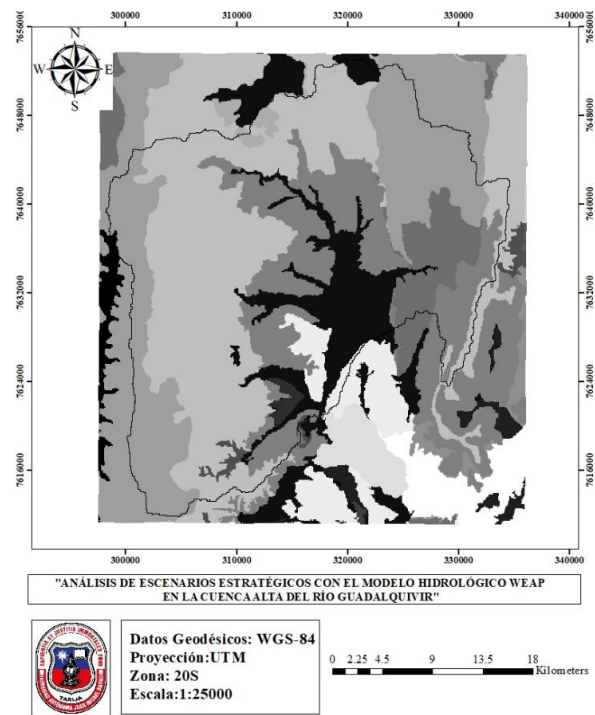
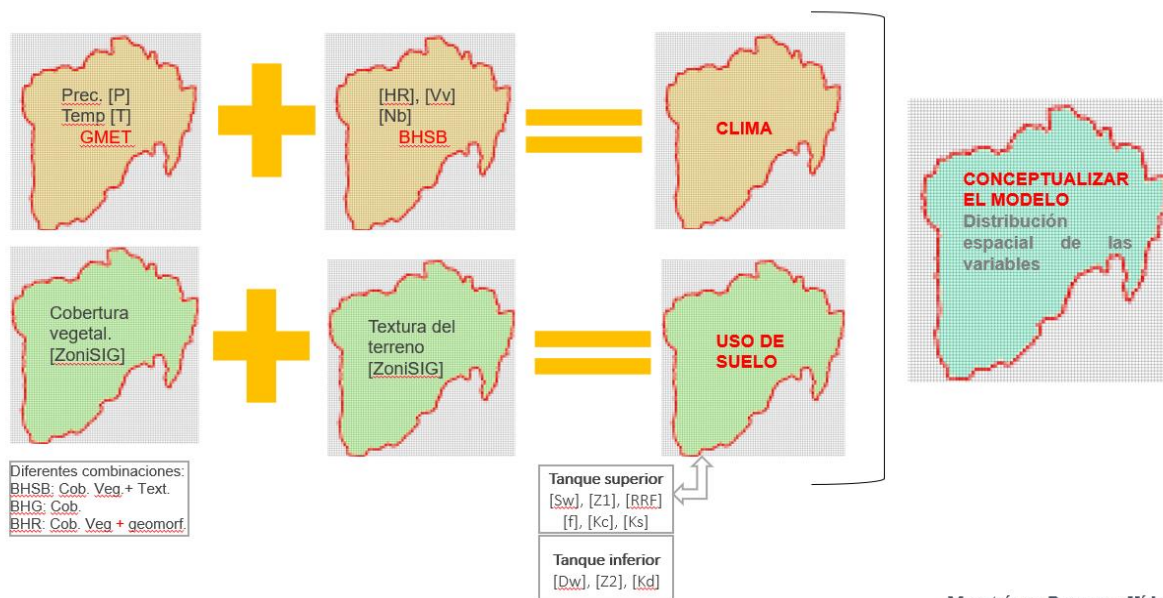


Figura 2. Archivo raster el polígono de cobertura vegetal y uso de suelos.



Maestría en Recursos Hídricos

Figura 3. Conceptualización de las variables climáticas y uso de suelos en el modelo hidrológico WEAP, cuenca alta del río Guadalquivir.

Cobertura vegetal generado		
Leyenda	Área en Argis [has]	Áreas en 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 difiere 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 de-

manda 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.

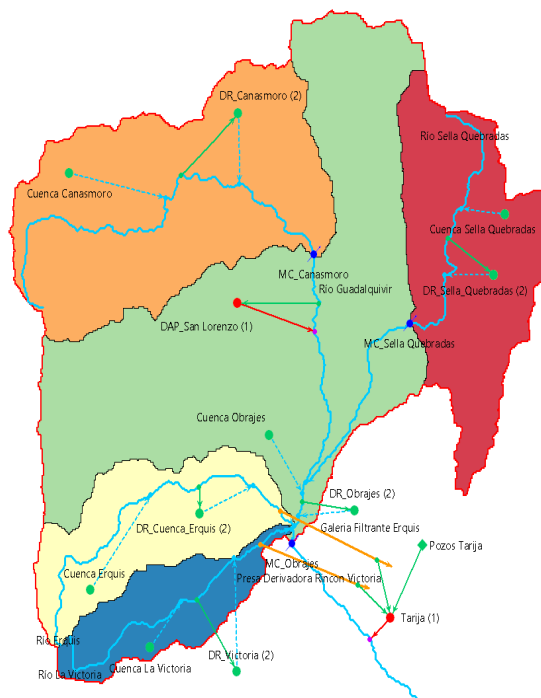


Figura 4. Esquema conceptual de la demanda de agua en la cuenca alta del río Guadalquivir.

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 km² 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.

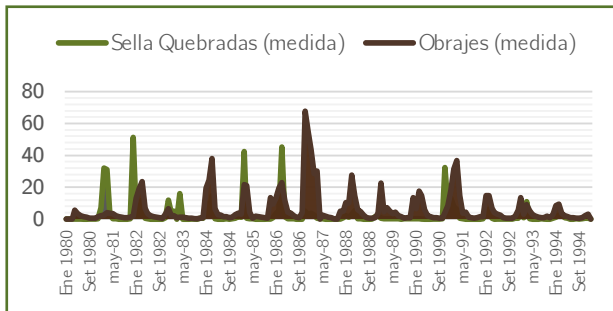


Figura 5. Comparación de caudales aforados en Sella Quebradas y Obrajes.

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.

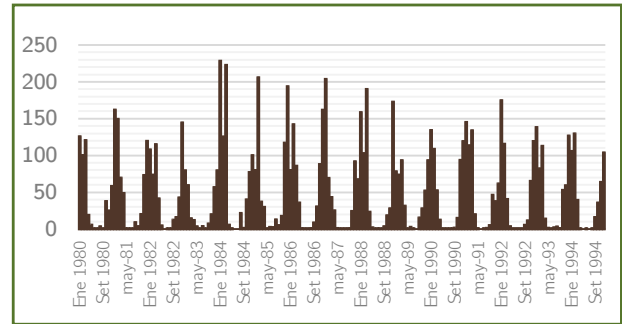


Figura 6. Registro de lluvias medias mensuales en la cuenca alta del río Guadalquivir.

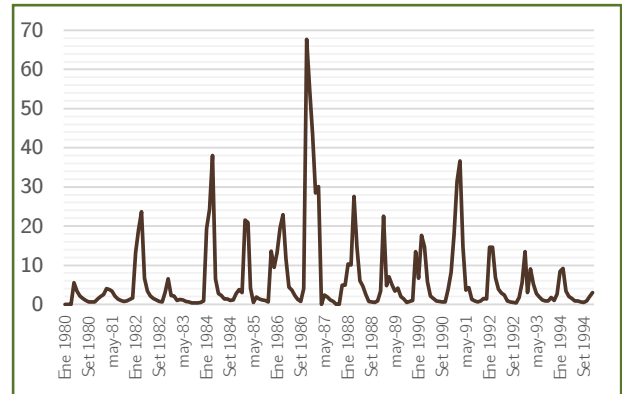


Figura 7. Registro de caudales medios mensuales en la cuenca alta del río Guadalquivir.

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 m³/s en cambio el año 1986 se tiene un gasto de 68 m³/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.

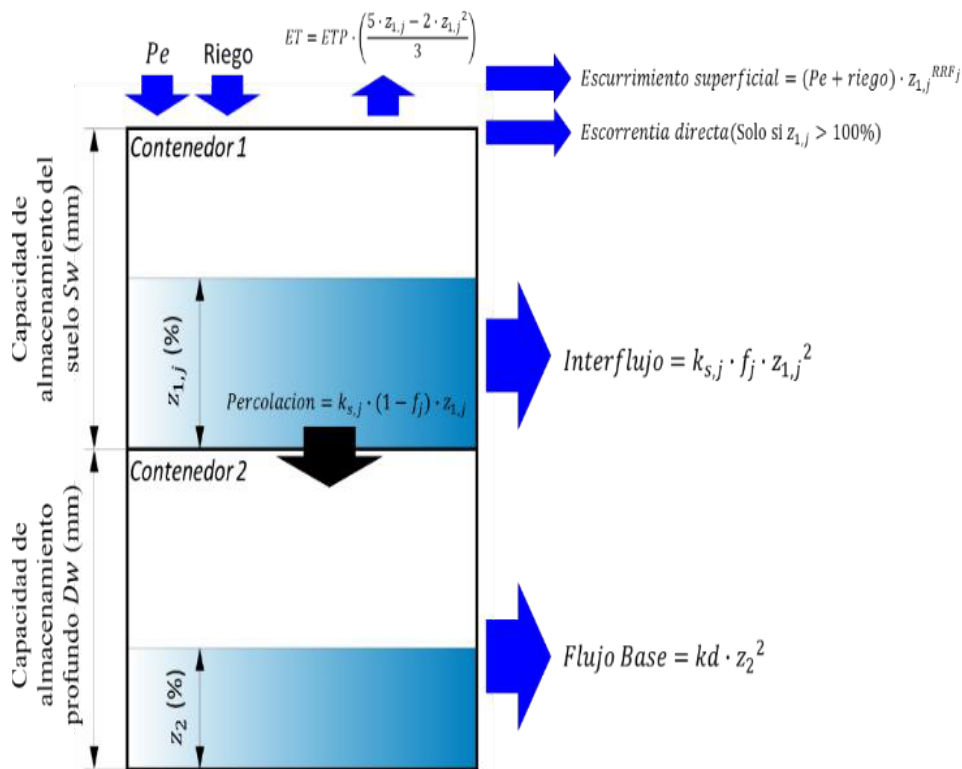


Figura 8. Elementos hidrológicos modelados en WEAP (método humedad del suelo).

Ecuación balde superior

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

↓ Cambio de humedad del suelo raíces.
 ↓ Precipitación Efectiva + riego + nieve
 ↓ Evapotranspiración real
 ↓ Escorrentía superficial
 ↓ E. subsuperficial interflujo
 ↓ Percolación

Ec.1

Variable	Definición	Descripción WEAP
$k_{c,j}$ (t)	Coefficiente de cobertura vegetal en un suelo j.	Coefficiente 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
$k_{s,j}$ (t)	Estimación de la conductividad en la zona de raíces saturada (mm/paso de tiempo)	Conductividad en zona radicular.
f_j	Coefficiente 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

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



Ec. 2

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

Ec. 3

$$Bias = \frac{\bar{Q}_s - \bar{Q}_o}{\bar{Q}_o} \cdot 100$$

Ec. 4

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	Almacenamiento relativo dado como fracción del almacenamiento total en la zona de profunda.	Z_2 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.

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

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.

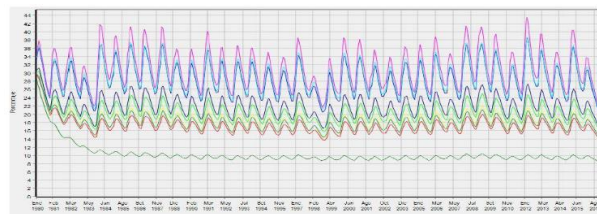


Figura 9. Flujo base en la cuenca alta del río Guadalquivir.

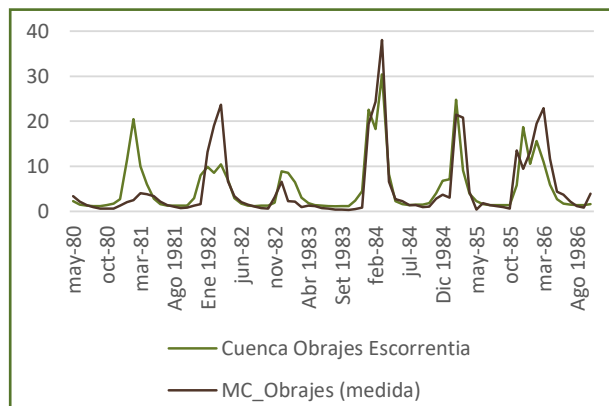


Figura 10. Hidrograma de caudales aforados y caudales simulados calibrados

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.

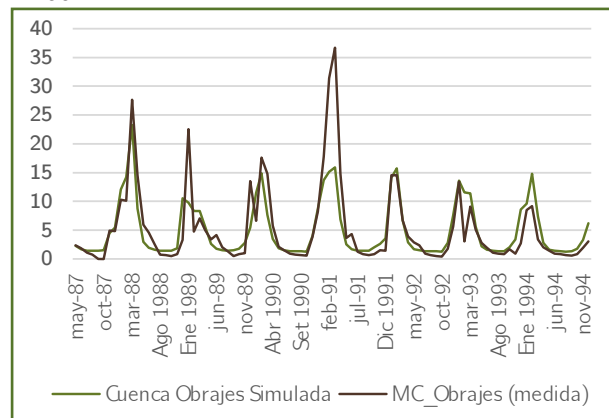


Figura 11. Hidrograma de caudales aforados caudales simulados periodo de validación.

Medidas de bondad de ajuste	Fórmulas	Valor obtenido
Nash- Sutcliffe	$NC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{s,i} - Q_{o,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - \bar{Q}_o)^2}$	0.64 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

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	$Bias = \frac{\bar{Q}_s - \bar{Q}_o}{\bar{Q}_o} \cdot 100$	-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.

3.6. Desarrollo de escenarios futuros.

Para la generación de escenarios futuros, se debe proyectar las variables cuya incidencia pueda alterar la respuesta hídrica de la cuenca. En el caso de la oferta hídrica inciden los componentes climáticos y uso de suelos, en el caso propio de la

demanda se debe contemplar principalmente la demanda de riego. En el caso de las variables climáticas se proyecta según el modelo MPI-ESM-MR, para condiciones de déficit de agua, que propone el balance hídrico superficial de Bolivia.

Un elemento principal, es inferir el modelo hidrológico a partir de la información actual, es prever el funcionamiento futuro de obras de gran envergadura como presas, atajados, sistemas de riego, agua potable. En el caso de la proyección se considera que las presas Rumi Cancha, Pajchani y Huacata operan según el diseño que fue concebido. Para conceptualizar los embalses se sigue el siguiente proceso:

- ⊙ Año de inicio u operación del embalse.
- ⊙ Capacidad de almacenamiento.
- ⊙ Curva de elevación, relación entre el volumen y elevación del reservorio.
- ⊙ Evaporación neta, es igual a la evaporación menos la precipitación promedio del embalse.
- ⊙ Máximo efluente hidráulico, se refiere al caudal saliente de la obra de toma.
- ⊙ Pérdidas de agua subterránea, la tratarse de material rocoso la infiltración será mínima.
- ⊙ Volumen observado, volumen de almacenamiento generado en el embalse.
- ⊙ Volumen inactivo o muerto.

El cambio climático, genera variación en la temperatura global que afecta a la precipitación y al ciclo hidrológico. El esquema hidrológico en WEAP se muestra.

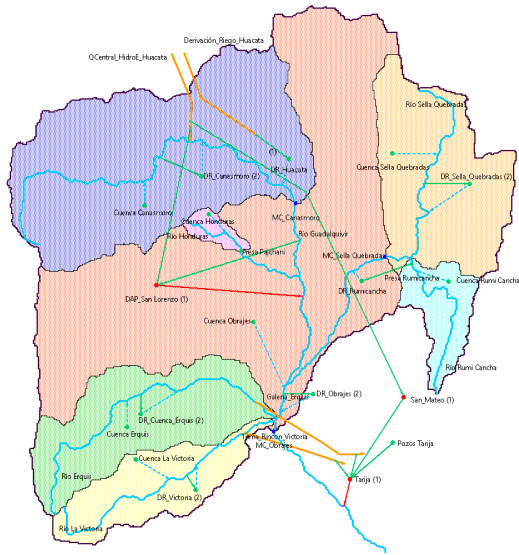


Figura 12. Modelo hidrológico para escenarios futuros.

3.7. Incidencia del cambio climático en los caudales mensuales.

Al generar la proyección de caudales mensuales en la cuenca alta del Río Guadalquivir, se proyecta para un contexto de déficit hídrico en condiciones secas, donde se utiliza la proyección de precipitación y temperatura que propone el Balance hídrico superficial de Bolivia (MPI-ESM-MR), las variables climáticas humedad relativa, velocidad de viento y nubosidad se mantienen cíclicas hasta el año de análisis. En cuanto a la combinación cobertura vegetal y textura se mantiene invariante para el paso de tiempo. Los resultados que se obtienen se muestran.

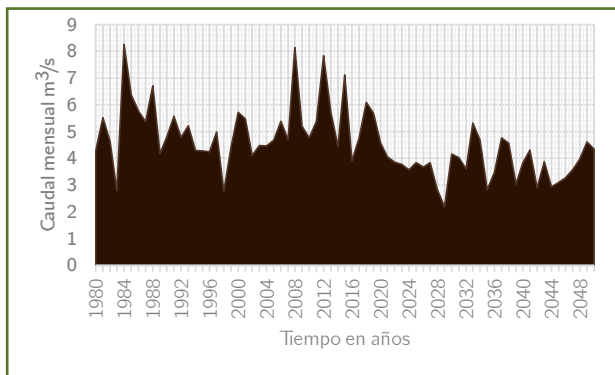


Figura 13. Simulación de caudales medios futuros para la cuenca alta del río Guadalquivir.

En la figura se aprecia que los caudales mensuales de la cuenca alta del Río Guadalquivir en el periodo de 1980 a 2020 presenta una leve tendencia a reducir. En cambio, la proyección en el periodo del déficit hídrico 2020 a 2050 presenta una disminución en el caudal mensual.

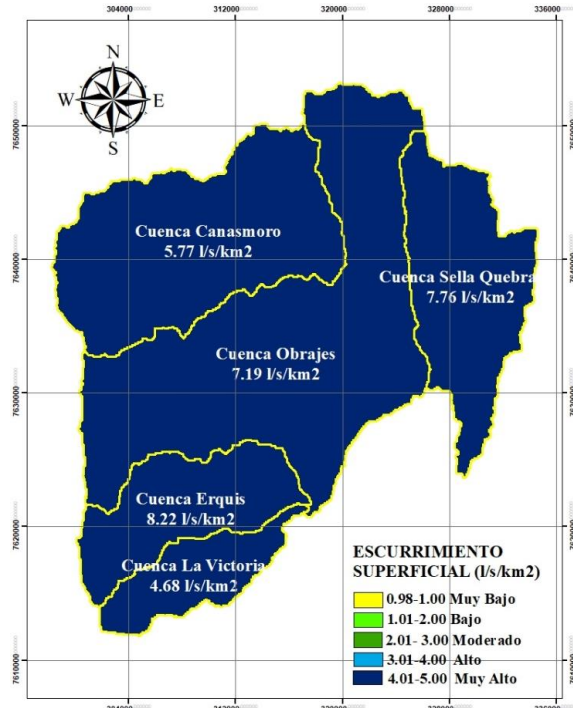


Figura 14. Caudal unitario para cada catchment periodo 1980 – 2016.

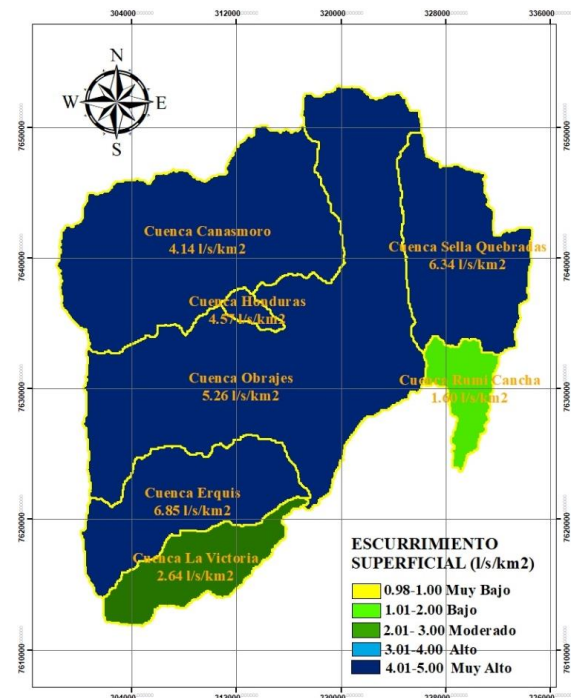


Figura 15. Caudal unitario para cada catchment periodo 2020 a 2050.

Promedio de los caudales mensuales periodo 1980 a 2016 es 5.15m³/s. El promedio de los caudales del periodo 2017 a 2050, es 3.94m³/s. existiendo una disminución del caudal del 23.46%.

3.8. Índice de escasez para un evento extremo seco.

El índice de escasez corresponde a la relación porcentual entre la demanda y la oferta de agua.

Donde: I_e :índice de escasez (%), Dh Demanda hídrica (m³/s), Oh promedio de los caudales observados, Fr : Factor de reducción por calidad de agua y caudal ecológico.

$$I_e = \frac{Dh}{Oh} \cdot Fr \cdot 100$$

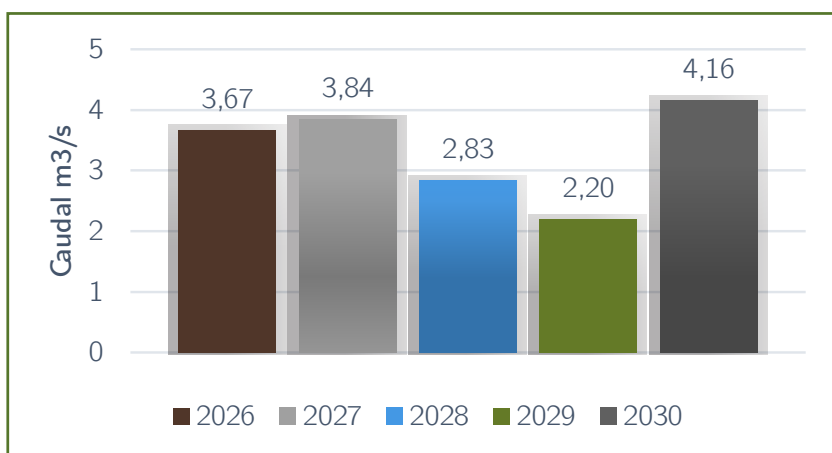


Figura 15. Simulación de caudales medios futuros.

Al analizar situaciones extremas condiciones secas, se aprecia el año que presenta el menor gasto de la serie histórica proyectada; año es el 2029 el caudal es 2.20m³/s (promedio multianual).

Año	Demanda (m ³ /s)	Oferta (m ³ /s)	Índice de escases	Categoría
2029	21.55	26.39	82%	Demanda alta
2030	19.73	49.94	40%	Demanda apreciable
2031	20.78	48.28	43%	Demanda apreciable
2032	21.28	43.30	49%	Demanda apreciable
2033	19.73	63.76	31%	Demanda apreciable
2034	20.39	56.14	36%	Demanda apreciable
2035	25.26	33.86	75%	Demanda alta

Tabla 9. Índice de escasez condiciones secas periodo 2029 - 2035.

La cuenca alta del Río Guadalquivir por efecto de sus ríos tributarios tiene mediana disponibilidad de agua, teniendo alta demanda de consumo de agua para riego y otros usos. La categoría medio alta del índice de escasez señala que en la cuenca presenta déficit hídrico; es un problema presente sobre todo en la época seca, por lo que se enfrenta serios problemas tales como la sequía que condiciona a los productores mantener sus procesos de producción en sistemas a secano. El déficit hídrico o las limitaciones se extienden también para otros usos, tales como el consumo humano y los animales.

3.9. Análisis de estrategias que compensen los efectos del déficit hídrico condiciones secas.

Al examinar la proyección futura 2020 a 2050, para un déficit hídrico condiciones secas, se evidencia un fenómeno adverso; los resultados de la modelación muestran que la demanda de agua en la cuenca tiende a incrementarse, y los caudales mensuales disminuyen con el paso del tiempo, al calcular el índice de escasez se constata que se encuentra en la categoría medio alto; de esta situación nace la interrogante ¿Qué se puede hacer ante tal situación?

La demanda de la cuenca presenta una tendencia normal de crecimiento, aspecto que no se puede regular, pero se puede optimizar los sistemas de distribución de agua. Para la oferta se puede generar líneas estratégicas o planes que optimicen el aprovechamiento hídrico de la cuenca alta del Río Guadalquivir.

Para ello se plantea líneas estratégicas que contribuyen como medios para sosegar los efectos del cambio climático. Que a su vez implica optimizar y garantizar la disponibilidad del agua y acceso para la vida (agua potable, riego y biodiversidad) y el desarrollo integral.

Las líneas estratégicas que se plantean para optimizar el aprovechamiento hídrico de la cuenca alta del Río Guadalquivir son:

- ⦿ Gestión de riego, disponibilidad de agua para riego y desarrollo integral.
- ⦿ Gestión de la calidad hídrica y resiliencia de los sistemas de vida.

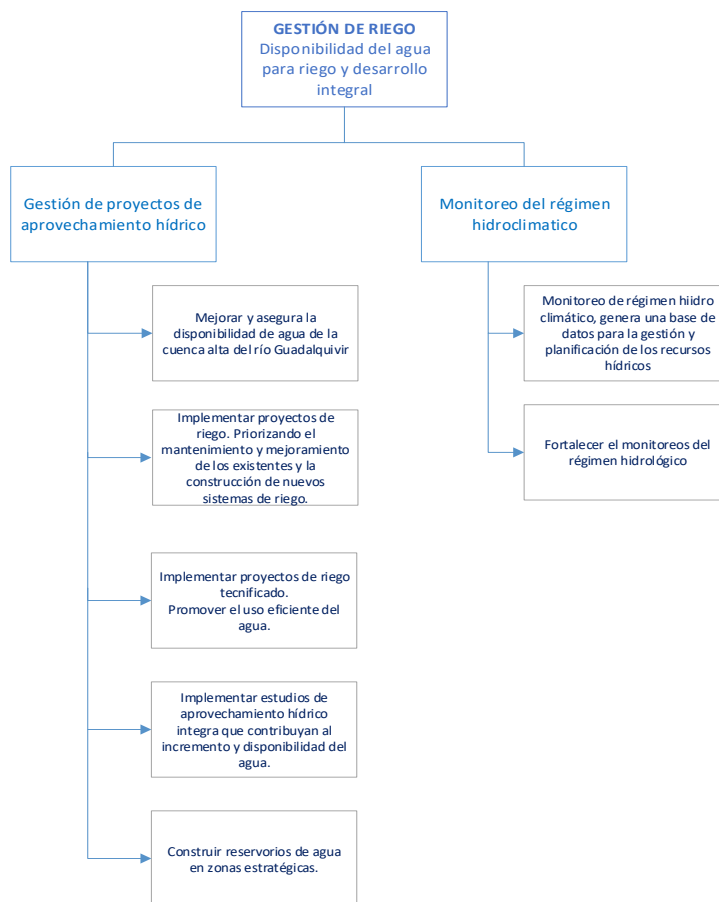


Figura 16. Líneas de acción y acciones específicas de la estrategia “Disponibilidad de agua para riego y desarrollo integral”.

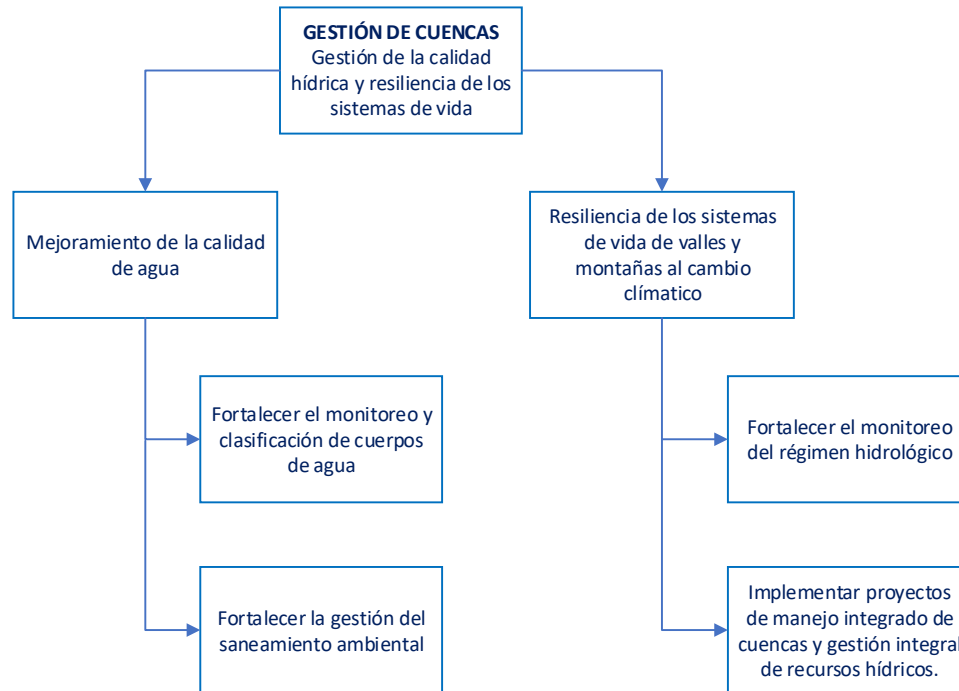


Figura 17. Líneas de acción y acciones específicas de la estrategia “Gestión de la calidad hídrica y resiliencia de los sistemas de vida”.

4. Discusión

Para el desarrollo del modelo hidrológico es importante conocer las características de la cuenca alta del Río Guadalquivir a cabalidad, considerando, en el caso de la oferta las variables climáticas, uso de suelo; en el caso de la oferta considerar las presas, obras de tomas, sistemas de agua potable y riego, derivaciones.

Otro elemento sustancial para lograr un buen modelado es conocer a cabalidad la ecuación del método humedad de suelo, y que representa cada término, tanto del tanque superior como inferior. El modelador debe adaptarse a la información disponible, realizar una revisión documental detallada, luego, debe validar la información recabada. El proceso de selección de datos y validación es sustancial porque de ello depende la proximidad del modelo hidrológico a la realidad sea esta presente o futura.

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.

El proceso de validación, se obtiene métricas aceptables; tanto para el coeficiente de NASH y BIAS, indicando que el modelado se adecua en el transcurso del tiempo.

Para proyectar escenarios alternos, se debe reducir la incertidumbre, partiendo de información disponible, inferir en eventos que tienen mayor probabilidad de acontecer, en el periodo de tiempo analizado. En el caso del estudio se considera la variación de la precipitación y temperatura en condiciones de déficit hídrico, y que los reservorios operan según su diseño.

Para generar el escenario alternativo se trabaja con las proyecciones de precipitación y temperatura en condiciones secas (MPI-ESM-MR), que recomienda el balance hídrico nacional; según dicha condición de déficit hídrico, se proponen planes que mitiguen dicho escenario.

El modelo hidrológico WEAP, tiene la versatilidad de simular el escenario que se desee analizar y proponer alternativas de solución que reduzcan el impacto, pero dichos planes deben ser realizables y ajustables al contexto de la cuenca. Por tal motivo, en el presente trabajo se propone dos planes en la gestión de riego y gestión de cuenca.

Se plantea líneas de acción específicas que garantizar la disponibilidad de agua para riego y el desarrollo integral (consumo humano, riego e industria) que mitiguen el efecto del cambio climático.

Gestión de riego: En este contexto, se debe fortalecer el desarrollo del riego en microcuencas con déficit hídrico. Aprovechar el aporte del agua como las precipitaciones en época húmeda, que proyecte la construcción de reservorios, de tal manera que permita cosechar y almacenar el agua en épocas de lluvia, incrementando la disponibilidad de agua en épocas de estiaje que sería regulado para aumentar efectivamente el área de riego, consumo humano y generación de energía eléctrica.

La seguridad hídrica para la producción agrícola bajo riego es importante para dinamizar la economía de los agricultores, generar fuentes de trabajo en el sector agropecuario, reduciendo la pobreza y la migración, generando desarrollo y elevando la calidad de vida en los pobladores de la cuenca alta del Río Gaudalquivir. Gestión de cuencas: El Río Guadalquivir y sus principales tributarios son las principales fuentes de agua de los sistemas de riego y consumo humano, la misma se encuentra vulnerable a la contaminación por la generación de residuos sólidos y aguas residuales provenientes de las poblaciones de mayor concentración, como: Canasmoro, San Lorenzo, Tarija Cancha, El Rancho, Sella, Erquiz, La Victoria, Coimata, entre otras comunidades.

La parte alta de la cuenca del Río Guadalquivir se caracteriza por su fisiografía aluvial y terrazas a lo largo del río, otra parte está conformada por pies de montes, laderas, colinas, serranías y montañas en las que la erosión hídrica de los suelos ocurre todos los años, siendo evidente la disminución de la cobertura vegetal.

Esto significa que se ha alterado el comportamiento hídrico y ambiental de la cuenca, su capacidad de regulación ha disminuido. Asimismo, son vulnerables a los riesgos hidrológicos como los riesgos climáticos (sequías, granizadas y heladas) que se agravan por el efecto de los cambios climáticos.

El propósito de esta línea estratégica es contribuir a mejorar la calidad del agua y revitalizar las funciones hídricas y ambientales de la cuenca, conservar la capacidad de regeneración de las zonas y sistemas de vida, reducir su vulnerabilidad al cambio climático.

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/>
- 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 modelamiento 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 Ullaauri 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.
- 🔖 Senamhi (2011). Cartilla técnica Ciclo hidrológico. Lima, Perú.
- 🔖 Servicio Nacional de Estudios Territoriales. (2005). Balance hídrico integrado y dinámico en el Salvador. San Salvador.
- 🔖 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/>