



GESTIÓN INTEGRAL DEL AGUA EN LA CUENCA DEL RÍO CHAMBO, CHIMBORAZO, ECUADOR

Adrián Villa¹, Elsa Cacho², Eduardo García³

^{1,2,3}IHCantabria – Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria
¹*adrian.villa@unican.es*, ²*elsa.cacho@unican.es*, ³*edelwar@gmail.com*

RESUMEN

El objetivo fue crear un modelo que ayude en la gestión integrada de los recursos hídricos en su conjunto. La GIRH se ha convertido en una práctica clave en la gestión del agua en todo el mundo, puesto que el agua es un recurso cada vez más escaso y su gestión sostenible se ha convertido en un desafío global crítico [1]. La GIRH se basa en cinco principios fundamentales: reconocer el agua como un recurso finito y vulnerable, promover una gestión integrada y participativa, asegurar un enfoque de cuenca hidrográfica, garantizar la sostenibilidad ambiental, económica y social, y promover la equidad y la justicia social [2].

El modelo desarrollado (Modelo SIMCA) tiene en cuenta estos principios y busca ayudar en la gestión del agua para que esta sea sostenible, equitativa y eficiente, características básicas de la GIRH [3].

El modelo se ha puesto en práctica en la Cuenca Hidrográfica del Río Chambo (CHRC), Chimborazo, Ecuador y ha servido de base para el desarrollo del Plan de Manejo Integral e integrado de la Cuenca. Instrumento que promueve la gestión sostenible del recurso agua en sus diferentes usos y aprovechamientos a través de la identificación y priorización de inversiones en infraestructura, medidas de gestión y gobernanza del agua.

Palabras clave

Modelo SIMCA, Gestión Integrada de Recursos Hídricos, Indicadores agregados.

1. INTRODUCCIÓN

Los modelos son importantes en la GIRH porque proporcionan una herramienta para simular el comportamiento del ciclo hidrológico y su interacción con la demanda de agua. Estos modelos permiten entender cómo se comportan las cuencas hidrográficas en términos de la cantidad y calidad del agua, y cómo las distintas acciones humanas y ambientales afectan a la disponibilidad de los recursos hídricos. Además, los modelos permiten a los tomadores de decisión evaluar los impactos de diferentes opciones de gestión del agua y tomar decisiones informadas y basadas en evidencia.

Existen multitud de modelos para la GIRH que se utilizan y son aceptados a nivel mundial, estos pueden ser; modelos hidrológicos (SRBM, RRTM, CAMEL, etc.), modelos de gestión del agua (WRPM, IWRM, etc.) o modelos de calidad del agua (RWQM, RGBWQM, etc.). El problema reside en que para realizar la GIRH, teniendo en cuenta todo lo que esta abarca [2], conlleva la utilización de varios modelos de diferentes tipologías, una tarea compleja, lenta e ineficiente.

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

El principal objetivo del Modelo SIMCA no es otro que combinar las tipologías de los modelos antes comentados en una única herramienta simple, eficiente y flexible. Se ha desarrollado un modelo que resuelve de forma ágil y con la mínima información posible, la secuencia: hidrología, gestión, calidad e hidroeconomía. Entonces, el SIMCA se convierte en una herramienta de planificación del agua a escala de cuenca que trata de resolver de forma integrada y simplificada los principales flujos y procesos relacionados con el ciclo del agua, para llegar a unos indicadores agregados que resulten informativos.

2. METODOLOGÍA

El modelo SIMCA es una herramienta de planificación del agua a escala de cuenca que trata de resolver de forma integrada y simplificada los principales flujos y procesos relacionados con el ciclo del agua, para llegar a unos indicadores agregados que resulten informativos.

El modelo consta de 4 módulos secuenciales e interrelacionados, que son: el módulo hidrológico, el módulo de gestión del agua, el módulo de calidad del agua y el módulo de indicadores agregados (Figura 1 Izq.). Es un modelo ágil y rápido capaz de resolver con poca información de partida la secuencia recientemente comentada. En la Figura 1 Dcha. se muestran los inputs necesarios del modelo diferenciando por módulos, así como los principales outputs de los mismos.

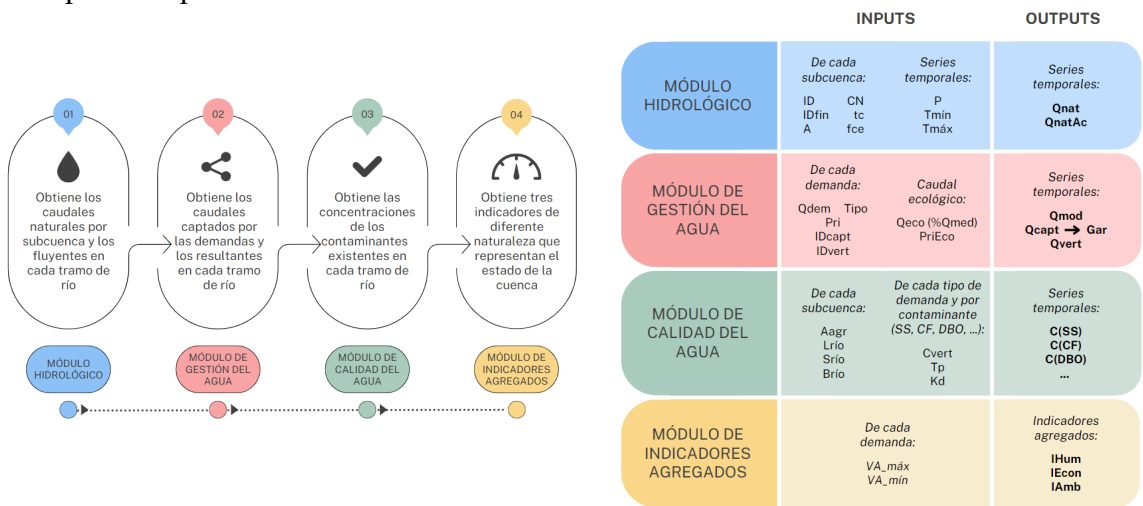


Figura 1. Esquema general del modelo SIMCA en cuatro pasos (Izq.). Inputs y principales outputs del modelo SIMCA por módulos (Dcha.).

2.1 MÓDULO HIDROLÓGICO

El primer módulo es el de hidrología, que obtiene los caudales en régimen natural generados en cada subcuenca y los fluyentes por cada tramo de río de las mismas. Este módulo ha empleado el modelo hidrológico denominado MELCA (Modelo de Equilibrio Logístico para Cuenas Andinas), desarrollado por IHCantabria, pero podría utilizarse cualquier otro. El MELCA es un modelo semi-distribuido enfocado en representar los procesos de transferencia precipitación-caudal en cuencas tropicales andinas con presencia de páramos y bofedales, apto para cuencas de montaña en Colombia, Ecuador y norte de Perú. Este modelo presenta las siguientes características diferenciales:

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

- El modelo incorpora solamente 3 parámetros (τ , E y S_0) que guardan relación con otros parámetros previamente usados en hidrología aplicada: número de curva, capacidad de almacenamiento del suelo, tiempo de concentración (t_c), etc.
- Las ecuaciones del modelo se resuelven con un esquema numérico simple, para cualquier paso de tiempo, y empleando tanto caudales medios como instantáneos.
- El modelo representa de forma diferenciada el proceso de conversión de la lluvia en escorrentía y el de propagación de la escorrentía al punto de salida.

Las cuencas hidrográficas son sistemas complejos que persiguen continuamente un equilibrio dinámico, dado por una combinación del forzamiento climático y algunas características clave del terreno. La evolución de la escorrentía (R) hacia el equilibrio sigue una ley clásica de crecimiento limitado o ecuación logística:

$$\frac{dR(t)}{dt} = K \cdot R(t) \cdot \left(1 - \frac{R(t)}{R_{eq}}\right) \quad (1)$$

La escorrentía de equilibrio R_{eq} se puede expresar como un coeficiente de escorrentía de equilibrio C_{eq} multiplicado por la precipitación instantánea: $R_{eq} = P \cdot C_{eq}$. Este coeficiente sigue una fórmula de tipo Budyko, en este caso gobernada por una relación de aridez dinámica (Ψ) que refleja las condiciones de humedad antecedentes de la cuenca.

$$C_{eq} = a^{\frac{\Psi}{H(\Psi)}} \quad ; \quad \Psi = \frac{E}{P} \quad ; \quad H(\Psi) = \frac{\mu(E)}{\mu(P)} \quad ; \quad a = e^{-\Psi} \quad (2) (3) (4) (5)$$

Donde E es la evapotranspiración corregida por altitud y viento, particularidades de las cuencas andinas. Se ha demostrado que muchas de las fórmulas clásicas para el cálculo de la evapotranspiración, como la de Penman-Monteith, tienden a sobreestimar la evapotranspiración potencial en zonas altas de montaña [4]. El modelo incorpora una corrección de la evapotranspiración en el proceso de cálculo.

La tasa de crecimiento, K , de la ecuación logística es una función lineal de la precipitación: $K = P / S_0$, donde S_0 representa un espesor característico del suelo en mm.

$$S_0 = 0,192 \cdot \frac{\lambda}{\Psi} \quad ; \quad \lambda = \frac{S_{II}}{E} \quad ; \quad S_{II} = 25,4 \cdot \left(\frac{1000}{CN} - 10\right) \quad (6) (7) (8)$$

Donde CN es el número de curva, el cual tiene en cuenta los usos convencionales del suelo y para este caso particular, la superficie de páramo y bofedal, ecosistemas andinos con una capacidad de almacenamiento del suelo muy superior a la de otros ecosistemas.

La ecuación logística representa la producción de agua sin considerar ningún tiempo de viaje o enrutamiento desde las zonas de producción de escorrentía hasta la salida de la cuenca. Cuando el intervalo de tiempo de análisis es del mismo orden de magnitud que el tiempo de respuesta de una cuenca, se debe agregar un método de propagación o factor de retraso para transformar la escorrentía (R) en caudal (Q), medido en la salida de la cuenca.

Considerando un modelo lineal de enrutamiento (cualquier otro método puede ser válido, incluido un desfase temporal constante) se llega a la siguiente ecuación diferencial:

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

$$\frac{dQ(t)}{dt} = \frac{1}{\tau} \cdot [R(t) - Q(t)] \quad ; \quad \tau \cong t_c \quad (9) (10)$$

Donde R y Q representan la escorrentía total y la descarga medida en la salida de la cuenca.

2.2 MÓDULO DE GESTIÓN DEL AGUA

El módulo de gestión del agua obtiene los caudales modificados en cada tramo y los caudales captados por cada demanda. Para ello tiene en cuenta los caudales naturales obtenidos en el módulo hidrológico anterior y todos los puntos de demanda existentes en la subcuenca con su información básica (caudal demandado, tipo de uso, prioridad de uso, subcuenca en la que se capta y subcuenca en la que se vierte).

Todas las demandas tienen un orden de prioridad asignado (1, 2, 3, ...). Estas se van satisfaciendo en orden de prioridad, de manera que una demanda con una prioridad mayor (p.e. 1) se satisfará antes que una con una prioridad menor (p.e. 3). En este sentido, nunca una demanda de prioridad menor podrá satisfacerse antes que una demanda de prioridad mayor, aunque esté situada aguas arriba.

Además, este módulo es capaz de tener en cuenta el caudal ecológico en cada tramo de río, para ello tiene en cuenta un valor porcentual del caudal natural medio que se toma como caudal ecológico y la prioridad de uso del mismo. El caudal ecológico se trata como una demanda más, la cual se capta y devuelve en la misma subcuenca con una determinada prioridad.

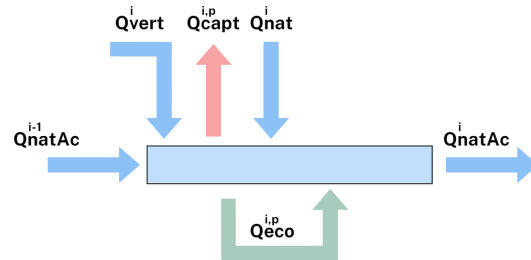


Figura 2. Esquema de funcionamiento del módulo de gestión del agua.

La principal ecuación que gobierna el módulo de gestión del agua es la siguiente, donde la ‘i’ representa cada subcuenca y la ‘p’ representa la prioridad de cada uso:

$$Q_{natAc}^i = \sum Q_{natAc}^{i-1} + Q_{nat}^i + \sum Q_{vert}^i - \sum Q_{capt}^{i,p} - Q_{eco}^{i,p} + Q_{eco}^{i,p} \quad (11)$$

2.3 MÓDULO DE CALIDAD DE AGUAS

El módulo de calidad de aguas obtiene la concentración media de contaminante de cada tramo de río. Para ello tiene en cuenta los caudales modificados fluyentes obtenidos en el módulo de gestión anterior, los vertidos producidos a lo largo de la cuenca (con sus concentraciones (C)), el lavado de suelos producido en las subcuencas y la autodepuración de los ríos (Figura 3).

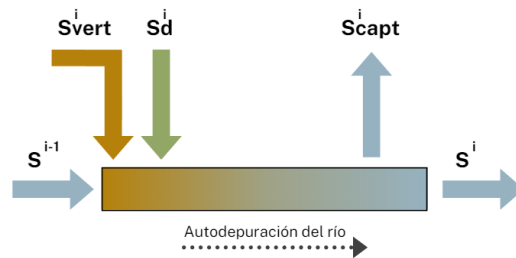


Figura 3. Esquema de funcionamiento del módulo de calidad del agua.

La principal ecuación que gobierna la acumulación de carga contaminante (S) a lo largo de la cuenca, así como el proceso de autodepuración es la siguiente:

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

$$C^i = \frac{2 \cdot (S^{i-1} + S_{vert}^i + S_d^i) - 2 \cdot B_{et}^i \cdot C_{eq}^i \cdot Q_{med}^i - \sum (C^{i-1} \cdot Q_{capt}^i)}{2 \cdot Q_{modAc}^i - \sum Q_{capt}^i} \quad (12)$$

Siendo:

$$C_{eq}^i = \frac{S^{i-1} + S_{vert}^i + S_d^i}{Q_{modAc}^{i-1} + \sum Q_{vert} + Q_{nat}^i} \quad ; \quad B_{et}^i = 1 - e^{-\frac{K_d \cdot L_{eq}^i}{V}} \quad ; \quad (13) \quad (14) \quad (15)$$

$$L_{eq}^i = L_{rio}^i \cdot \frac{S^{i-1} + 0,5 \cdot S_{vert}^i + 0,5 \cdot S_d^i}{S^{i-1} + S_{vert}^i + S_d^i}$$

2.4 MÓDULO DE INDICADORES AGREGADOS

El Módulo de Indicadores Agregados, cuarto módulo del Modelo SIMCA, proporciona tres indicadores que representan el estado de la cuenca en tres dimensiones distintas: satisfacción de las necesidades básicas, rendimiento económico de los usos del agua y calidad ambiental y servicios ecosistémicos. Estos tres planos son la base del enfoque integrado de la GIRH [5], que se basa en la integración de los aspectos sociales, económicos y ambientales en la gestión del agua, con el objetivo de lograr una gestión equitativa, sostenible y participativa del agua. Los indicadores agregados resultantes de este módulo, resumen de forma concisa el estado de la cuenca y las consecuencias de posibles actuaciones en la misma.

Indicador de Satisfacción de las Necesidades Básicas (IHum)

Esta primera dimensión está relacionada con los niveles de pobreza en la cuenca y se expresa en porcentaje de población con las necesidades básicas cubiertas. Las condiciones básicas incluyen abastecimiento humano, agricultura de subsistencia y abastecimiento de animales.

Para considerar que se cubren las necesidades básicas deben satisfacerse conjuntamente, cada día del año, dos criterios; disponibilidad de una dotación básica de agua para abastecimiento humano, de al menos el 90% de la demanda máxima, y calidad mínima del agua disponible en el cauce principal, de menos de 30 mg/L de concentración media de sólidos en suspensión. En el momento en el que se incumpla cualquiera de las dos condiciones, se considerará que las necesidades básicas de la población de esa subcuenca están insatisfechas para ese día. En este sentido, el índice agregado de satisfacción de necesidades básicas se define como la media ponderada del porcentaje de tiempo en que se satisfacen cada una de estas demandas:

$$IHum = \frac{\sum G \cdot Q_{dmax}^{med}}{\sum Q_{dmax}^{med}} \cdot 100 \quad (16)$$

Indicador Agregado del Rendimiento Económico de los Usos del Agua (IEcon)

La segunda dimensión es puramente económica (\$/m³) y trata de reflejar el valor añadido total aportado por el agua en la cuenca en un año medio. El valor económico de los usos del agua en la cuenca está asociada a cada demanda y refleja el valor añadido que aporta el agua en los diferentes procesos productivos. Buscando una vez más el equilibrio entre simplicidad y rigor formal, el modelo caracteriza la dependencia del agua para la producción en cada tipo de uso (hidroeléctrico, agrícola e industrial), según una serie de curvas de productividad tipo con dos grados de libertad (Valor Añadido máximo y Valor Añadido mínimo).

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

$$IEcon = \frac{VA_{m\acute{a}x} - VA_{m\acute{i}n}}{100} \cdot G + VA_{m\acute{i}n} \quad (17)$$

Indicador Agregado de la Calidad Ambiental y Servicios Ecosistémicos (IAmb)

En la tercera dimensión se cubre la calidad ambiental y la preservación de los servicios ecosistémicos. La provisión y el mantenimiento de los servicios ecosistémicos tienen correlación la alteración del régimen natural de caudales y con la alteración de la calidad del agua de los ríos. Por ello se ha optado por definir un indicador agregado de calidad ambiental (de 0 a 100), que combine aspectos de cantidad (mantenimiento del régimen natural de caudales) y de calidad de agua (representada por los sólidos en suspensión totales).

Para tener en cuenta la alteración del régimen natural de caudales, las condiciones de referencia vienen dadas por el régimen natural de caudales, y su grado de alteración se calcula basándose en un índice de uso muy extendido en hidrología, el índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe. La medida de alteración del caudal propuesta (MAC) es la suma del complementario del NSE aplicado sobre el logaritmo de los caudales y ponderado con la longitud de cada tramo. La MAC toma valores entre 0 (caudales modificados iguales a los naturales) e infinito (máxima diferencia, no acotada). Resulta más operativo emplear un índice con un rango de valores acotado, con valores entre 0 y 1.

$$MAC = \sum_j L_i \cdot \frac{\sum_i [\log(Q_{nat,i,j}) - \log(Q_{mod,i,j})]^2}{\sum_i [\log(Q_{nat,i,j}) - \log(Q_{nat,j})]^2} \quad (18)$$

Por otro lado, para tener en cuenta la alteración de la calidad del agua y con el fin de simplificar la explotación e interpretación de los resultados del modelo, se ha seleccionado como único parámetro de calidad del agua los SST, asociados tanto a los vertidos puntuales de aguas residuales, como a la contaminación difusa procedente del lavado de cuenca. Para obtener la expresión que relacione los SST (mg/L) con el impacto adimensional se ha tomado el método para calcular el WQI [6], determinando el peso parcial de los SST. Por tanto, la expresión del indicador agregado de la calidad ambiental y servicios ecosistémicos es la siguiente, siendo c_1 , c_2 , c_3 y c_4 , constantes iguales a 0'35, 2, 50 y 0'8:

$$IAmb = 100 \cdot \left(\frac{e^{\left(\frac{-MAC}{1+MAC/c_1}\right)^{c_2}} + e^{(-SST/c_3)^{c_4}}}{2} \right) \quad (19)$$

3. CASO DE APLICACIÓN

El Modelo SIMCA se ha utilizado en el proyecto de Manejo Integral e Integrado de la Cuenca Hidrográfica del Río Chambo, Chimborazo (Ecuador) realizado por IHCantabria. La CHRC abarca un territorio de unos 3.600 km² en la zona central de Ecuador y es representativa de buena parte de los retos y oportunidades a los que se enfrentan las zonas andinas. Desde el punto de vista de la planificación y de la gobernanza del recurso hídrico, la CHRC es un buen ejemplo de las dificultades que hay que superar para armonizar los diversos usos del agua en una cuenca, que a menudo son antagónicos y excluyentes:

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

- La agricultura, actividad más importante de la cuenca, reduce los caudales fluyentes, promueve la construcción de embalses y produce contaminación de origen difuso;
- La producción hidroeléctrica altera los caudales fluyentes y el hábitat fluvial;
- Las industrias requieren agua, que puede ser contaminada en la producción;
- Las ciudades requieren agua limpia para el consumo humano y sistemas de saneamiento para devolverla de manera adecuada a los cauces;
- El turismo, la pesca y los usos lúdicos de los sistemas fluviales necesitan ríos sanos.

4. RESULTADOS

El fruto de aplicar el modelo SIMCA en la CHRC ha sido, entre otros resultados, la elección de tres proyectos que buscan ayudar en la GIRH resolviendo problemas de conservación, disponibilidad y calidad del agua, estos son; “Embalse en el Río Atillo y Plan de desarrollo socio-turístico de las Lagunas de Atillo”, “Mejora de sistemas de agua potable existentes y definición de nuevos en Guamote” y “Plan de protección de la cuenca del río Alao”.

El Banco Mundial hace hincapié en la importancia de optimizar el uso del agua y la necesidad de adoptar un nuevo paradigma de almacenamiento de agua para enfrentar los desafíos del futuro en cuanto a la disponibilidad de agua [7]. En este sentido, el primer proyecto contribuiría a una mejor gestión del agua a largo plazo. Esto a su vez podría mejorar la resiliencia de la cuenca ante eventos extremos como sequías e inundaciones, y permitir un uso más eficiente y sostenible del recurso hídrico en la zona. Del mismo modo, el segundo proyecto mejoraría la eficiencia en el uso del agua, reduciendo así la demanda y la presión sobre las fuentes de agua, mejorando la seguridad hídrica y la calidad de vida de la población. Además, si se adoptan tecnologías y prácticas sostenibles, se podría lograr una mayor resiliencia y adaptación al cambio climático. Por último, el tercer proyecto es una estrategia efectiva para lograr una mejora en la sostenibilidad a largo plazo de la cuenca hidrográfica, al tiempo que se protege la biodiversidad y se proporciona servicios ecosistémicos.

Por su parte, el SIMCA ofrece unos resultados que pueden observarse en la comparativa de la Figura 4, donde se muestran los indicadores obtenidos en dos escenarios distintos. Por un lado el Escenario Actual (rosado) y por otro el Escenario Actual con los proyectos (azul).

Como puede observarse, con la ejecución de estos tres proyectos el indicador de la satisfacción de las necesidades básicas se ve aumentado en 30,2 puntos, el indicador de rendimiento económico de los usos del agua disminuye en 4,4 M\$/año, y el indicador de la calidad ambiental y servicios ecosistémicos aumentaría en 11,4 puntos.

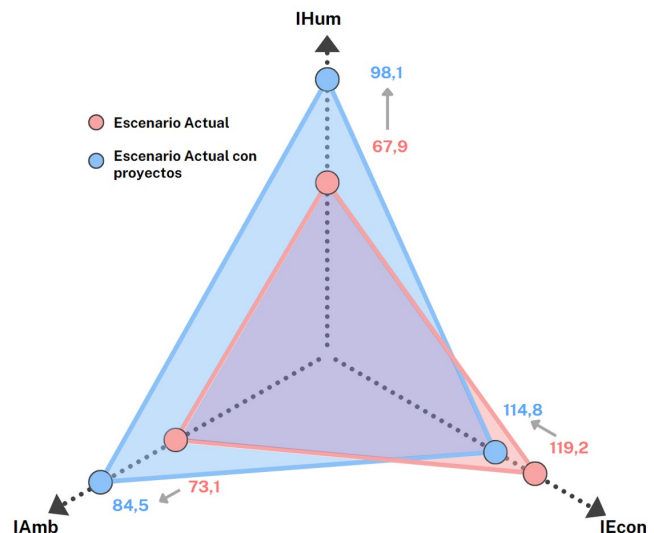


Figura 4. Radar chart de los tres indicadores agregados para dos escenarios de estudio.

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

La ejecución de los tres proyectos supondría una clara mejora de la seguridad hídrica y de la calidad de los servicios ecosistémicos, a pesar del pequeño decaimiento de la economía relacionada con los recursos hídricos. El Modelo SIMCA ha ayudado en la elección de los proyectos, desde una perspectiva de GIRH, aportando tres indicadores que ofrecen una comparativa entre escenarios.

5. CONCLUSIONES

La evaluación de proyectos de desarrollo hidrológico a menudo implica la consideración de múltiples factores, y el uso de indicadores sociales, ambientales y económicos proporciona una evaluación más completa y holística de los proyectos propuestos. La GIRH se centra en la gestión de los recursos hídricos de manera integrada, y la consideración de múltiples aspectos como hace el Modelo SIMCA son fundamentales para asegurar la sostenibilidad y la equidad en la gestión de los recursos hídricos.

En este sentido, el Modelo SIMCA es una herramienta valiosa para los gestores y responsables políticos encargados de tomar decisiones relacionadas con el desarrollo y la gestión de los recursos hídricos en la cuenca. Sin embargo, es importante destacar que el éxito de este modelo dependerá de la calidad de los datos de entrada y de la calidad de las metodologías utilizadas.

Nomenclatura

ID	Número identificativo de la subcuenca
IDfin	Número identificativo de la subcuenca situada aguas abajo
A	Área de la subcuenca (Km ²)
fce	Factor corrector de la evapotranspiración de la subcuenca (adi)
Tmín, Tmáx	Temperatura mínima y máxima de la subcuenca (°C)
Pri	Orden de prioridad de uso de la demanda
Tp	Tasa de producción de un contaminante en la zona agrícola (mg/L/Km ²)
Kd	Constante de desaparición de un determinado contaminante (1/h)
VA_máx	Valor máximo de productividad unitaria del agua de la demanda (\$/m ³)
VA_mín	Valor mínimo de productividad unitaria del agua de la demanda (\$/m ³)
G	Garantía de demanda (%)

REFERENCIAS

- [1] UNESCO (2009). Water in a changing world.
- [2] FAO, (2002). Gestión integrada de los recursos hídricos.
- [3] Global Water Partnership (2014). Integrated Water Resource Management.
- [4] Córdova, M, et al (2015). Evaluation of the Penman-Monteith (FAO 56 PM) method for calculating reference evapotranspiration using limited data.
- [5] United Nations, (2015). Sustainable Development Goals. Goal 6.
- [6] United Nations, (2007). Global Drinking Water Quality Index.
- [7] World Bank, (2023). What the Future Has in Store: A New Paradigm for Water Storage.