



## INFORME EJECUTIVO

Simulación hidrológica en la cuenca alta del río Guayllabamba y unidades hidrológicas aportantes de agua para Quito. Enfoque gestión integrada de los recursos hídricos



## INFORME EJECUTIVO

# Simulación hidrológica en la cuenca alta del río Guayllabamba y unidades hídricas aportantes de agua para Quito. Enfoque gestión integrada de los recursos hídricos





## **INFORME EJECUTIVO**

**Simulación hidrológica en la cuenca alta del río Guayllabamba y unidades hídricas aportantes de agua para Quito. Enfoque gestión integrada de los recursos hídricos**

## **Fondo para la Protección del Agua – FONAG, 2014**

### **Autores**

Andrea Vera - Programa Gestión del Agua - FONAG

### **Edición**

Jacqueline Cisneros - Programa Gestión del Agua - FONAG

### **Fotos**

Andrea Vera - FONAG

**ISBN:** 978-9942-9983-6-1

**Línea editorial:** graphus® 290 2760

**Diseño de esta cartilla:** graphus® 322 7507

**Impresión:** creative@graphusecuador.com

Impreso en Quito-Ecuador

# Contenido

-  **4**    Presentación
-  **5**    Acciones por la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos
-  **6**    Área de Estudio
-  **7**    Información Básica de Entrada
-  **13**   Simulación Hidrológica
-  **17**   Resultados Preliminares
-  **20**   Bibliografía



## Presentación |

Los modelos matemáticos para la caracterización de la dinámica entre oferta y demanda y la evaluación de los recursos hídricos hoy en día se han transformado en herramientas versátiles, gracias al apoyo informático. Estos modelos son indispensables para recrear -con alto grado de aproximación- la realidad hidrológica de una unidad hídrica y analizar así el funcionamiento de los sistemas hidrológicos bajo diferentes esquemas de distribución y uso del agua.

El desarrollo de la simulación hidrológica bajo el enfoque de gestión integrada de los recursos hídricos incluye, entre otros, aspectos relacionados con la variabilidad climática en el periodo 1962 a 2012, las condiciones físicas de la cuenca alta del río Guayllabamba y unidades hídricas aportantes de agua para Quito, las proyecciones de demanda, las condiciones regulatorias, los objetivos de operación e infraestructura disponible de los cuatro usos principales de agua: consumo humano, riego, hidroelectricidad e industria, que permitieron la obtención de resultados preliminares.

El Fondo para la Protección del Agua - FONAG en su Programa Gestión del Agua, desde el 2010, incursionó en la generación de insumos técnicos confiables que ayuden a cuantificar la cantidad, calidad y disponibilidad del agua por unidad hídrica, e identificar los porcentajes de demanda cubierta y la distribución espacial por *catchments*, considerando todas las variables posibles que respondan a la necesidad real de satisfacción equitativa de los recursos hídricos y coadyuven a una adecuada planificación y gestión integrada de los recursos hídricos a corto, mediano y largo plazo.



# Simulación hidrológica en la cuenca alta del río Guayllabamba y unidades hídricas aportantes de agua para Quito. Enfoque gestión integrada de los recursos hídricos



## Acciones por la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos

Eventos mundiales como la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Agua (1977), la Conferencia Internacional sobre Agua y Medio Ambiente (1992), la Cumbre para la Tierra (1992), el Decenio Internacional del Agua Potable y del Saneamiento Ambiental (1981 – 1990), la Cumbre Mundial celebrada en Johannesburgo (2002), el Decenio Internacional para la Acción, “El agua, fuente de vida 2005 – 2015” (2003) y la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el desarrollo sostenible (2012), son herramientas que buscan la adopción de un enfoque estratégico, sustentable y sostenible de los recursos hídricos. Al momento, estas declaraciones permitieron iniciar un importante proceso de sensibilización en la opinión pública del mundo sobre los riesgos de la falta de planificación y manejo de los recursos hídricos. Los compromisos asumidos por gobiernos y representantes de alto nivel para el manejo de los recursos hídricos, evidencian la firme intención de fomentar la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos.

El Ecuador desde el 2012 a través de la Secretaría del Agua, organismo rector, impulsa la formulación e implementación del Plan Nacional de Recursos Hídricos y los Planes de Gestión Integral e Integrada de Recursos Hídricos por cuenca hidrográfica, en las zonas continental e insular, que fundamente su accionar para una adecuada gestión en cuanto al uso, aprovechamiento y conservación del agua. Además, el Plan Nacional de Gestión se enfocará en la prevención de los efectos adversos por inundaciones y por estiaje; y, considerará la distribución equitativa, ya que existen sectores con superávit y otros con déficit del recurso hídrico (SENAGUA, 2014).

Enmarcado en la misión y objetivos del Plan Nacional de Recursos Hídricos, el Fondo para la Protección del Agua – FONAG, organismo pionero, impulsa la investigación técnica y la innovación tecnológica para la cuantificación de cantidad, calidad y disponibilidad de agua, con enfoque de

gestión integrada de recursos hídricos en la cuenca alta del río Guayllabamba y las unidades hídricas orientales aportantes de agua para el Distrito Metropolitano de Quito: Antisana, Oyacachi, Chalpi Grande y Papallacta.

Es así que, desde el 2006, el FONAG invierte en la implementación de varias herramientas tecnológicas de apoyo a la actualización y tratamiento de datos hidroclimáticos y automatización de la simulación hidrológica del ámbito geográfico de acción del FONAG, que contempla el análisis dinámico entre oferta y demanda de agua, para cuatro usos principales: agua de consumo humano, riego, hidroelectricidad e industria.

En esta línea de acción, en el 2010, a partir de las bases establecidas en colaboración técnica del Instituto Francés para el Desarrollo IRD, se dio inicio a la simulación hidrológica, con el empleo de la herramienta informática Water Evaluation and Planning System WEAP del Instituto Ambiental de Estocolmo SEI, que ofrece la posibilidad de obtener interesantes salidas para el análisis de políticas en favor de la gestión integrada (SEI, 2014). A la fecha se obtuvo como resultados preliminares la simulación hidrológica del estado actual de los recursos hídricos, asociado a la variabilidad climática y políticas de consumo de agua, la que representa un importante insumo técnico para la toma de decisiones en aspectos de planificación y gestión integrada de los recursos hídricos de la cuenca.



## Área de Estudio

El ámbito geográfico de acción del FONAG comprende la cuenca alta del río Guayllabamba y las unidades hídricas orientales aportantes de agua para Quito: Antisana, Chalpi Grande, Oyacachi y Papallacta, un área de 5527 Km<sup>2</sup> que representa el 1.95% de la superficie total del Ecuador. Desde el punto de vista político-administrativo, el ámbito de trabajo se localiza en las provincias de Pichincha y Napo.

El *parteaguas* de la Cordillera Oriental divide el área en dos sistemas hidrográficos, la vertiente de la cuenca alta del río Guayllabamba desemboca en el Océano Pacífico, y las vertientes de las unidades hídricas orientales de Oyacachi, Chalpi Grande, Papallacta y Antisana afluentes del río Amazonas que finalmente desemboca en el Océano Atlántico.

De acuerdo a la división y codificación Pfafstetter (UICN, 2008), asumida oficialmente por el Ecuador en el 2010 mediante el Acuerdo Ministerial SENAGUA Nro 2010-66, en el área se consideran las unidades hídricas correspondientes a los niveles 6 y 5. Estas unidades albergan alrededor de 2.5 millones de habitantes, de los cuales aproximadamente el 80% se asientan en los centros consolidados del Distrito Metropolitano de Quito.





relevante incorporar datos sobre: 1. Aspectos biofísicos que caracterizan al área de estudio como cobertura vegetal, usos de suelo, tipos de suelo, geología, pendientes, red de drenaje, trasvases internos y externos que alimentan al área de estudio, entre otros. 2. Información espacio-temporal de los componentes físicos que junto con el clima se suman a la oferta natural de agua y su distribución en la zona: glaciares, acuíferos e infraestructura disponible para atender la demanda de los usos de agua por sectores y *catchments* (áreas delimitadas por franjas altitudinales cada 500m), definidos en cada unidad hídrica. 3. Información espacio-temporal de los componentes que caracterizan la demanda de agua en la zona: *hidrozonas* y usos del agua de los sectores riego, agua potable, industria e hidroenergía. 4. Información de calidad de agua. 5. Información de operación y manejo administrativo de infraestructuras: costos de operación y mantenimiento. Estos dos últimos campos (4 y 5) aún no fueron incluidos en la simulación actual.

**TABLA 1**

**Información recopilada y tratada para los procesos de simulación hidrológica**

| Data Geográfica  |
|--|
| <i>Aspectos Biofísicos</i>   |
| DEM (Modelo de Elevación Digital)  |
| Cobertura de pendientes  |
| Límite geográfico de cuencas y demás unidades hídricas (Km <sup>2</sup> )      |
| Cobertura de ríos y cuerpos de agua  |
| Cobertura de uso de suelo  |
| Cobertura de tipo de vegetación  |
| Cobertura de tipo de suelo   |
| Cobertura de geología - litología  |
| Cobertura de división política administrativa                                  |
| Cobertura de canales y trasvases   |
| Cobertura de embalses  |
| Cobertura de áreas irrigadas   |
| Información hidrometeorológica   |
| Datos de Demanda   |
| <i>Usos de Demanda (agua potable, riego, industrias, hidroeléctrica)</i>       |
| Concesiones de agua por uso  |
| Número de beneficiarios (agua potable, industria, hidroeléctrica)              |
| Requerimiento volumétrico para generación hidroeléctrica (m <sup>3</sup> /año) |
| Cantidad de hectáreas irrigadas  |
| Consumo per cápita de agua (m <sup>3</sup> /persona/año)                       |



## Información recopilada y tratada para los procesos de simulación hidrológica

Consumo por hectárea de agua ( $m^3/ha/año$ )

Porcentaje real de consumo de agua

### Hidrozonas

Área de *hidrozona* y porcentaje respecto al *catchment*

Capacidad de retención de agua por tipo de uso de suelo (mm/mes)

Infiltración por tipos de usos de suelo (mm/mes)

Capacidad de retención de agua en la zona de raíces por tipo de cultivos (mm/mes)

Infiltración en la zona de raíces por tipo de cultivos (mm/mes)

Coefficiente de cultivos  $K_c$  (variaciones anuales dependiendo del tipo de cultivo)

Tecnologías de irrigación

## Datos de Oferta

### Clima

Precipitación (mm) series de datos históricos (1962 - 2012) promedios mensual interanual

Temperatura ( $^{\circ}C$ ) series de datos históricos (1962 - 2012) promedios mensual interanual

Humedad Relativa (%) series de datos históricos (1962 - 2012) promedios mensual interanual

Viento (m/s) series de datos históricos (1962 - 2012) promedios mensual interanual

Cobertura de Nubes promedio mensual del periodo 1962 - 2012

Latitud (grados decimales)

### Hidrología

Caudales ( $m^3/s$ ) series de datos históricos (1962 - 2012) promedio mensual interanual

Caudal de extracción de canales y trasvases ( $m^3/s$ )

Reservorios y represas (Caudales)

Flujo de Retorno (%)

Perdidas (%)

### Glaciares

Área de cobertura de glaciares ( $Km^2$ )

Área de la zona de ablación ( $Km^2$ )

Limites superior e inferior de temperatura que condicionan a la zona de ablación ( $^{\circ}C$ )

Caudal de escorrentía de glaciares ( $m^3/s$ )

### Acuíferos

Volumen de extracción de agua subterránea ( $m^3/s$ )

Capacidad de almacenamiento ( $m^3$ )

Flujo de recarga ( $m^3$ )

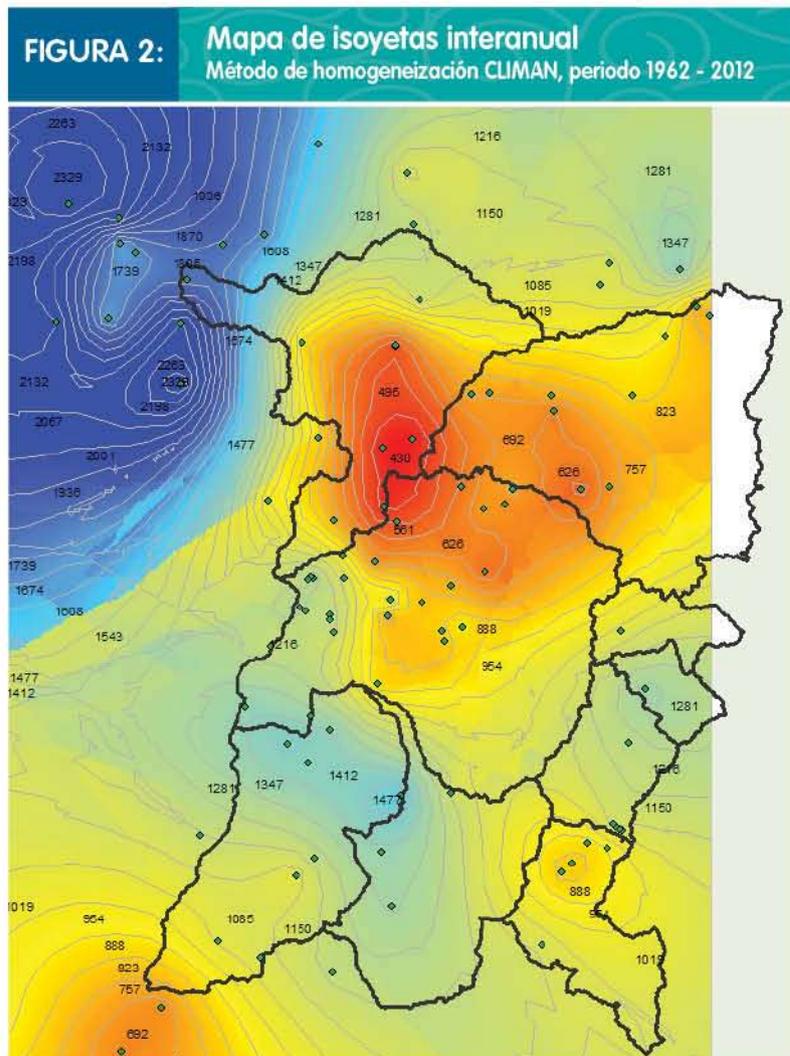
Profundidad del nivel freático

**Nota:** El proceso cartográfico se ejecutó en el Sistema de Coordenadas UTM, proyección WGS84, Zona 17S, Escala 1:50.000.

## Caracterización climática

La información climática que alimenta la simulación es caracterizada para cada una de las divisiones hídricas del área de estudio, representadas en WEAP como *catchments*. Esta información se obtiene tras los procesos de espacialización de los promedios mensuales interanuales de la bases de datos de las variables homogeneizadas: precipitación, temperatura, recorrido del viento, nubosidad y humedad del aire, considerando siempre que la data utilizada mantenga un registro superior o igual a 10 años. En está, se utilizó la información climática, de 93 estaciones, registrada principalmente por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología INAMHI y la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento EPMAPS que mantienen un monitoreo estable y continuo en el área de estudio.

Del procesamiento de datos climáticos se obtuvo que el rango de precipitación media interanual varía entre 400 mm a 1800 mm, ver Figura 2. Las zonas de menor precipitación se localizan en el cierre de las unidades hídricas Guayllabamba Alto, Pisque y se acentúa en Guayllabamba Medio, con una variación de 400 a 800 mm. Las zonas de mayor precipitación se presentan en las partes bajas de las unidades hídricas de San Pedro y Pita, en el suroeste de Guayllabamba Alto, y las partes altas de Chalpi Grande y Papallacta, con una variación entre los 1200 y 1500 mm, sin embargo, en el cierre de la unidad hídrica Guayllabamba Medio es posible observar precipitaciones que van desde los 1200 mm a 1800 mm. En la unidad hídrica Antisana el rango de precipitaciones es de 800 a 1100 mm.



Fuente: Vera, A. Programa Gestión del Agua - FONAG

## Identificación de Hidrozonas por Catchments

La cobertura vegetal y usos de suelo identificados en el área de estudio por TNC (2007) fueron reclasificados en 10 *hidrozonas*. Una *hidrozona* presenta características de regulación hídrica particulares que dependen de los procesos socioeconómicos desarrollados en cada *catchment* y aspectos físicos naturales propios de su ubicación geográfica en cada unidad hídrica (según división Pfafstetter: nivel 6 en las unidades hídricas orientales, y nivel 5 en las unidades hídricas que conforman la cuenca alta del río Guayllabamba).

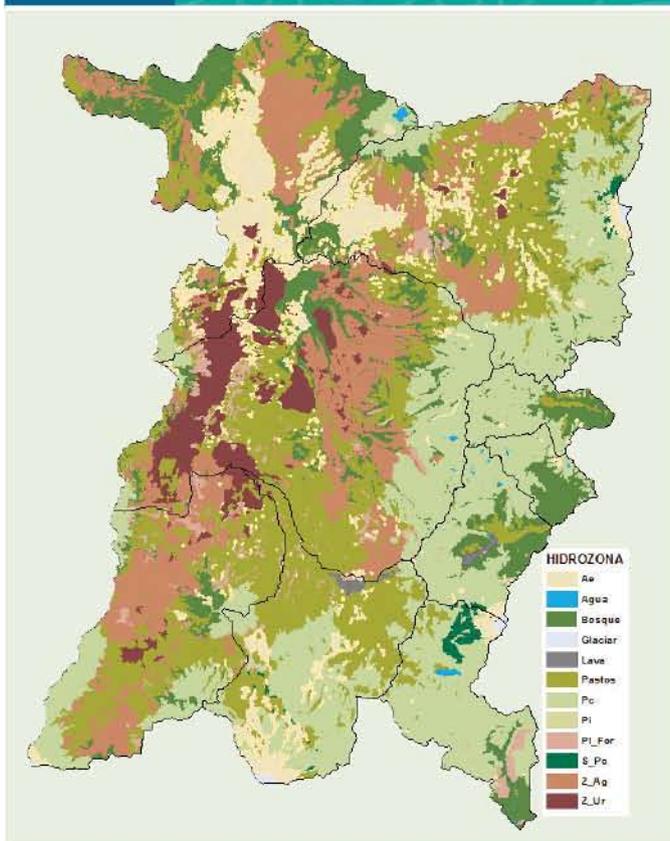
En el área de estudio, ver Figura 3 y Tabla 2, se evidencia la presencia de *hidrozonas* que favorecen a la regulación de los recursos hídricos (Pc, Bosque, S\_Pc, Pl\_For) en el flanco occidental de la Cordillera Oriental de los Andes y en las unidades hídricas orientales, excepto en partes importantes de Pita y Papallacta resaltan los Pastos. Mientras que, en la zona media de la cuenca alta del río Guayllabamba es mayoritaria la presencia de *hidrozonas* que condicionan la producción de agua (Z\_Ag, Pastos, Ae, Z\_Ur) en las que se desarrollan actividades agropecuarias, industriales y socioeconómicas.

**TABLA 2**

| Reclasificación por hidrozonas |                           |  |
|--------------------------------|---------------------------|--|
| Hidrozonas (%)                 | Cobertura y uso del suelo |  |
| Ae                             | (7.65)                    | Arenales, áreas erosionadas            |
| Lava                           | (0.23)                    | Lava                                   |
| Pastos                         | (24.11)                   | Pastos                                 |
| Bosque                         | (17.21)                   | Bosque                                 |
| Pl_For                         | (3.76)                    | Plantaciones forestales                |
| Pi                             | (0.12)                    | Paramos intervenidos                   |
| Pc                             | (24.09)                   | Paramos conservados                    |
| S_Pc                           | (0.41)                    | Paramos conservados en muy buen estado |
| Z_Ur                           | (5.86)                    | Zona urbana                            |
| Z_Ag                           | (15.92)                   | Aguacate                               |
|                                |                           | Alfalfa                                |
|                                |                           | Avena                                  |
|                                |                           | Caña                                   |
|                                |                           | Cebada                                 |
|                                |                           | Cebolla                                |
|                                |                           | Cultivo de Invernadero                 |
|                                |                           | Cultivos ciclo corto                   |
|                                |                           | Esparrago                              |
|                                |                           | Fréjol                                 |
|                                |                           | Frujilla                               |
|                                |                           | Limón                                  |
|                                |                           | Maíz                                   |
|                                |                           | Manzana                                |
|                                |                           | Mora                                   |
|                                |                           | Papa                                   |
| Tomate de árbol                |                           |  |
| Trigo                          |                           |  |

Fuente: Vera, A. Programa Gestión del Agua – FONAG

**FIGURA 3: Hidrozonas por unidad hídrica**



Fuente: Programa Gestión del Agua – FONAG

## Caracterización de la Demanda

La cuantificación de la demanda de agua depende en gran medida del conocimiento de los caudales otorgados por la SENAGUA (2010). Contar con la base de autorizaciones de uso y aprovechamiento de agua permitió cuantificar el caudal por tipos de uso de agua y por *catchments* de cada unidad hídrica. La representatividad por usos de agua en la zona, responde al orden porcentual de cantidad de caudal otorgado, ver Tabla 3: riego (36.0), hidroelectricidad (31.0), consumo humano (27.0), industria (1.8) y otros usos (3.5). El mayor volumen de caudal otorgado y con alto nivel de competencia entre usos son: Pisque, Guayllabamba Alto, San Pedro y Guayllabamba Medio; y, en las unidades hídricas orientales el tipo de uso con mayor volumen otorgado se destina a la provisión de agua para consumo humano, sin competencia relevante con otros tipos de uso consuntivo.

**TABLA 3**
**Tipo de usos de agua en cada unidad hídrica**

| Usos del agua  | Volumen (l/s) de agua otorgado |         |         |                   |                    |          |               |          |            |         |
|----------------|--------------------------------|---------|---------|-------------------|--------------------|----------|---------------|----------|------------|---------|
|                | San Pedro                      | Piña    | Pisque  | Guayllabamba Alto | Guayllabamba Medio | Antisana | Chalpi Grande | Oyacachi | Papallacta | Total   |
| Abrevadero     | 55.5                           | 22.6    | 105.1   | 39.9              | 27.9               |          |               | 1.6      | 0.5        | 253.1   |
| Doméstico      | 807.2                          | 282.6   | 275.1   | 2229.8            | 2119.6             |          |               | 0.7      | 14.3       | 5729.1  |
| Fuerza motriz  | 18.6                           |         | 40.2    | 533.6             |                    |          |               |          |            | 592.4   |
| Hidroeléctrica | 8318.6                         |         | 6027.0  | 6849.7            | 14204.9            |          | 4210.0        |          | 1320.0     | 40930.2 |
| Industria      | 732.8                          | 101.1   | 122.3   | 610.2             | 189.0              |          |               |          | 616.9      | 2372.3  |
| Agua de mesa   | 184.1                          |         | 1.3     |                   | 0.8                |          |               | 7.1      |            | 193.2   |
| Potable        | 1115.0                         | 2552.1  | 685.9   | 923.6             | 216.3              | 17830.0  | 3179.3        | 495.0    | 2605.0     | 29602.2 |
| Riego          | 9437.1                         | 5239.4  | 17218.6 | 11159.8           | 3850.8             |          |               | 598.0    | 105.9      | 47609.7 |
| Piscícola      | 176.1                          | 2392.9  | 320.2   | 181.4             | 21.1               |          |               | 123.0    | 156.3      | 3371.0  |
| Termal         | 75.8                           |         | 5.0     | 80.0              | 8.6                |          |               | 7.1      | 31.8       | 208.3   |
| Total          | 20920.8                        | 10590.7 | 24800.6 | 22608.0           | 20639.0            | 17830.0  | 7389.3        | 1232.5   | 4850.6     |         |

Fuente: Base de autorizaciones de uso y aprovechamiento de agua SENAGUA, 2010.

## Simulación Hidrológica

El desarrollo de la simulación inicia con la esquematización espacial hidrológica del área de estudio. A través de una interfaz gráfica de ingreso, WEAP proporciona una serie de objetos que permiten concatenar el amplio rango de temas en los que se desenvuelve la dinámica oferta y demanda de los recursos hídricos en la cuenca alta del río Guayllabamba y unidades hídricas aportantes de agua para Quito. Entre las múltiples interrelaciones se incluyeron aspectos relacionados con: i) Delimitación e identificación de *catchments*, ii) Red de drenaje, iii) Demandas por usos de agua representativos para cada unidad hídrica, iv) Infraestructura disponible de distribución de agua.

### Ingreso de Información Básica

La interfaz gráfica crea el espacio virtual para el ingreso de datos, referidos a la oferta y demanda de agua, diferenciando la información por módulos, como:

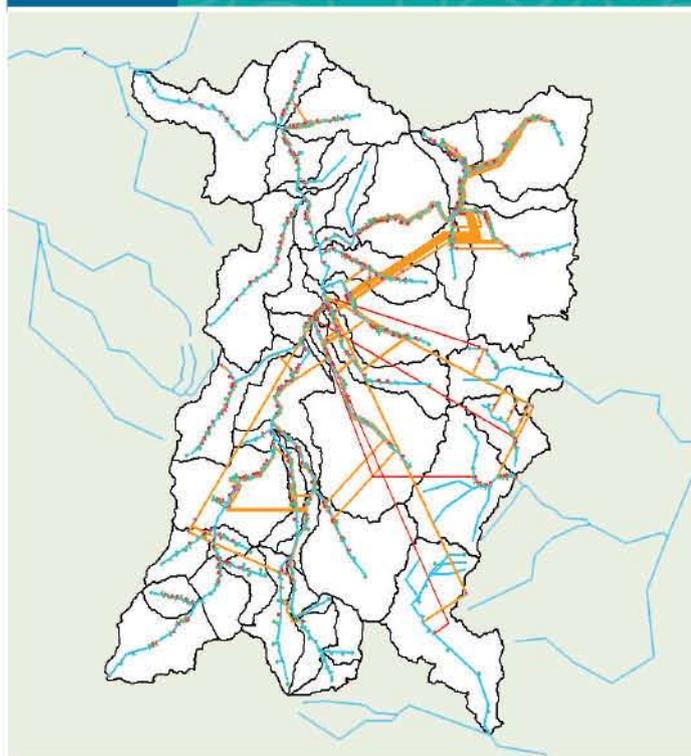
#### **Módulos de información básica para la cuantificación de demanda:**

- Tipos de demanda
- Usos de suelo y parámetros hidrofísicos por tipo de suelo asociados a la regulación de los recursos hídricos
- Calidad de agua.

#### **Módulos de información básica para la cuantificación de oferta:**

- Clima: promedios mensuales interanuales de variables climáticas estandarizadas, prioridad precipitación y temperatura, de 93 estaciones meteorológicas [1962 – 2012].
- Información física de los procesos hidrológicos de los glaciares en el área de estudio.

**FIGURA 4:** Distribución de agua en el ámbito de estudio



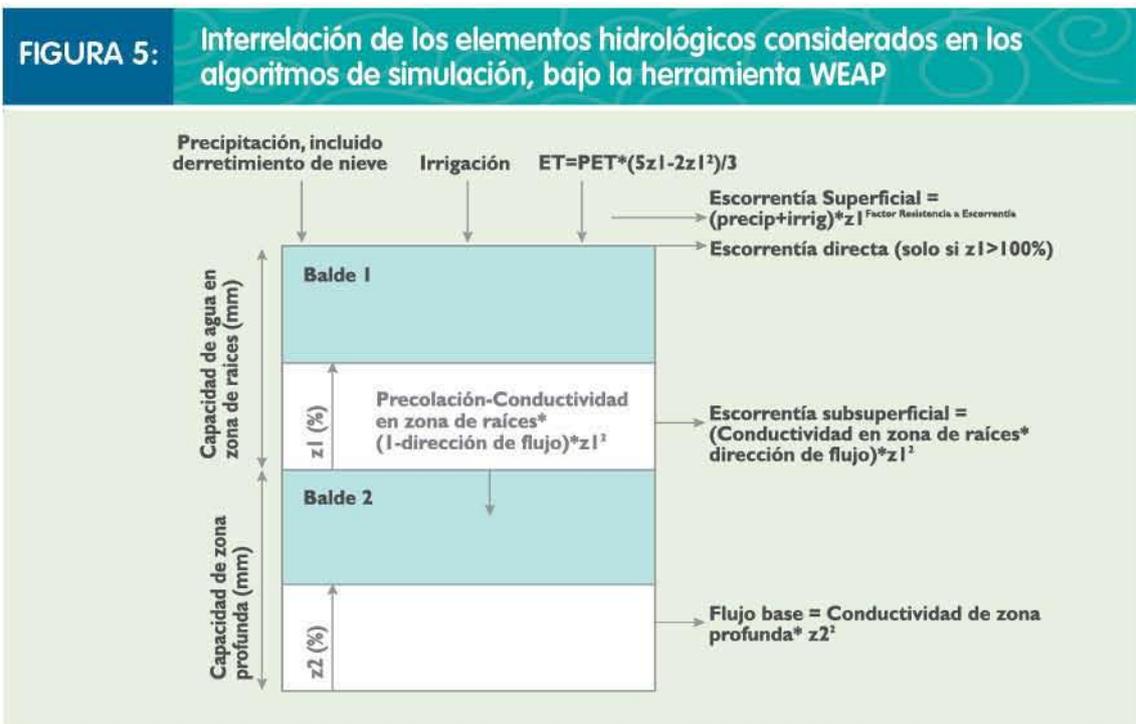
Fuente: Vera, A. Programa Gestión del Agua - FONAG

- Agua subterránea.
- Trasvases internos y externos que alimentan al área de estudio.

**Módulos de información básica para la validación o calibración de la simulación:**

- Caudal: promedios mensuales interanuales estandarizados de 11 estaciones hidrológicas [1962 – 2012].

Una serie de artículos (Yates *et al.*, 2005a, 2005b y 2008), describen a la simulación en WEAP como un proceso cuasi físico-unidimensional, con dos receptáculos de balance de agua para cada *hidrozona*, en los que el agua se reparte entre escorrentía superficial, escorrentía subsuperficial, infiltración, evaporación, flujo base y percolación. Los balances de cada *hidrozona* se suman para obtener el valor total en cada *catchment*, ver Figura 5.



Fuente: SEI, [www.weap21.org](http://www.weap21.org)

Entre las posibles aplicaciones del cálculo de balance de agua están estudios de: disponibilidad de agua para la producción agrícola, hidrología, conservación de suelos, drenaje, recuperación de suelos, repoblación forestal, establecimiento del régimen de humedad de suelos o de criterios de diferenciación climática ([www.weap21.org](http://www.weap21.org)).



## Corridas de la simulación

En cada corrida de la simulación se calculan los flujos hidrológicos transportados o contenidos en los ríos y acuíferos asociados, al mismo tiempo se descuenta la distribución de agua considerando las características de la red de distribución, embalses, regulaciones ambientales, prioridades y preferencias asignadas a los puntos de demanda. Las condiciones de operación del algoritmo de programación lineal maximiza la satisfacción de demanda hasta el mayor valor posible.

En estos procesos se incluyen rutinas diseñadas para representar la distribución del agua a corto, mediano y largo plazo a nivel de *catchments*, entre  $n$  tipos de usos de agua, desde una perspectiva de políticas de usos de agua y variabilidad climática. De acuerdo a los requerimientos, se pueden realizar estudios que incluyan la variable de cambio climático, modificaciones en la oferta de agua actual y proyectada, y cambios en la demanda de agua actual y proyectada (Purkey *et al.*, 2008).

## Calibración

La calibración, en proceso, del balance actual de los recursos hídricos contempla el análisis de los Indicadores estadísticos: Índice de eficiencia de Nash- Sutcliffe (ENS), sesgo porcentual (BIAS), raíz error cuadrático medio (RMSE) y coeficiente de determinación (R), que permiten comparar los caudales simulados y los caudales observados en los puntos de control hidrológico (estaciones hidrológicas operativas en el área de estudio) y evaluar la capacidad de predicción de la simulación hidrológica, ver Figura 6. La bondad de ajuste de los indicadores seleccionados determina si la simulación es o no apta para generar proyecciones a corto, mediano o largo plazo.

Como puntos de control, al momento se cuenta con 11 estaciones hidrológicas (H136, H143, H144, H145, H146, H148, H149, H150, H152, H158 y H159) administradas por el INAMHI, para el periodo 1962 – 2012, distribuidos de manera casi uniforme en el flanco occidental del área de estudio, excepto en la unidad hídrica Guayllabamba Alto que no cuenta con este tipo de monitoreo. Mientras que, resulta evidente que en las unidades hídricas orientales aportantes de agua para Quito no

**FIGURA 6:** Puntos de control hidrológico, ámbito FONAG



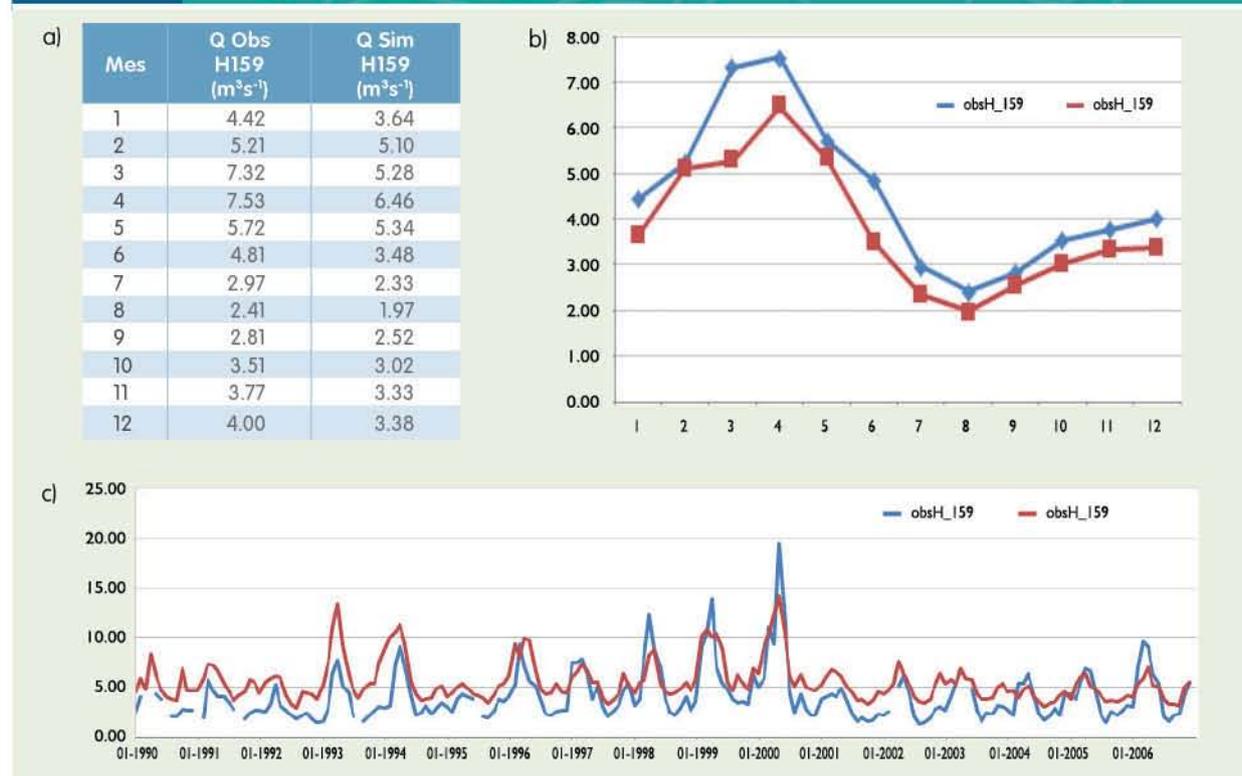
Fuente: Vera, A. Programa Gestión del Agua - FONAG

existen aún puntos de monitoreo y control hidrológico. Más adelante en el ajuste se incorporará la información de las estaciones que cuenten con un periodo de registro mínimo requerido para el proceso. Ej. Estaciones EPMAPS y ECOLUZ. Por otro lado, se considera a la estación H146 el punto de control de cierre de la cuenca.

La comparación de los caudales promedios mensuales interanuales estandarizados de los puntos de control y los caudales simulados, muestra que los puntos de control que ofrecen un mejor ajuste, por la calidad de información, para validar la simulación son: H136, H146, H149, H150 y H159; ver ejemplo en la Figura 7. Por el contrario, la calibración encontró como limitante al punto de control H152, debido a que la información que proporciona, resulta inconsistente para determinar el grado de aproximación entre el caudal simulado y el observado.

Como escenario de referencia de cálculo de caudal simulado y por ende de calibración se considera al periodo histórico 1963 a 2012, debido a que la mayoría de estaciones hidrológicas y meteorológicas estandarizadas estabiliza su registro de datos a partir del año 1963.

**FIGURA 7:** Comparación de caudales observado y simulado en la estación H159, unidad hídrica San Pedro



Fuente: Vera, A. Programa Gestión del Agua - FONAG

**Nota:** a) Cálculo de los caudales observados y simulados en la estación H159 [1963 – 2012], b) Ajuste de caudales medios mensuales interanuales observados y simulados, c) Ajuste de caudales medios anuales observados y simulados.



El proceso de calibración actual se concentra en el análisis de sensibilidad de la interacción entre las variables involucradas en la simulación para definir la influencia que tienen unas sobre otras, la prioridad sobre el conjunto y su influencia sobre la capacidad predictiva de la simulación hidrológica. Para el caso, las propiedades hidrofísicas del suelo juegan el rol de ajuste, siendo las variables que no cuentan con datos propios del área de estudio, por tanto asumidos.

## Resultados Preliminares

De la interpretación de los valores resultantes, de la aplicación de los indicadores de bondad de ajuste, ver Tabla 4, se obtiene que el Índice de Eficiencia Nash-Sutcliffe NSE (1970) presenta mejor ajuste estadístico para la comparación de los caudales simulado y observado.

**TABLA 4**

### Interpretación de indicadores estadísticos para la calibración y la validación en el punto de control, Estación H159

| Indicador/Periodo | NSE  | PBIAS% | RMSE% | R    |
|-------------------|------|--------|-------|------|
| 1963 - 1974       | 0.33 | -14    | 39    | 0.48 |
| 1975 - 1989       | 0.50 | -8     | 39    | 0.57 |
| 1990 - 2012       | 0.71 | -21    | 35    | 0.59 |
| 1963 - 1989       | 0.44 | -11    | 9     | 0.54 |
| 1975 - 2012       | 0.64 | -16    | 36    | 0.57 |
| 1963 - 2012       | 0.60 | -15    | 37    | 0.55 |

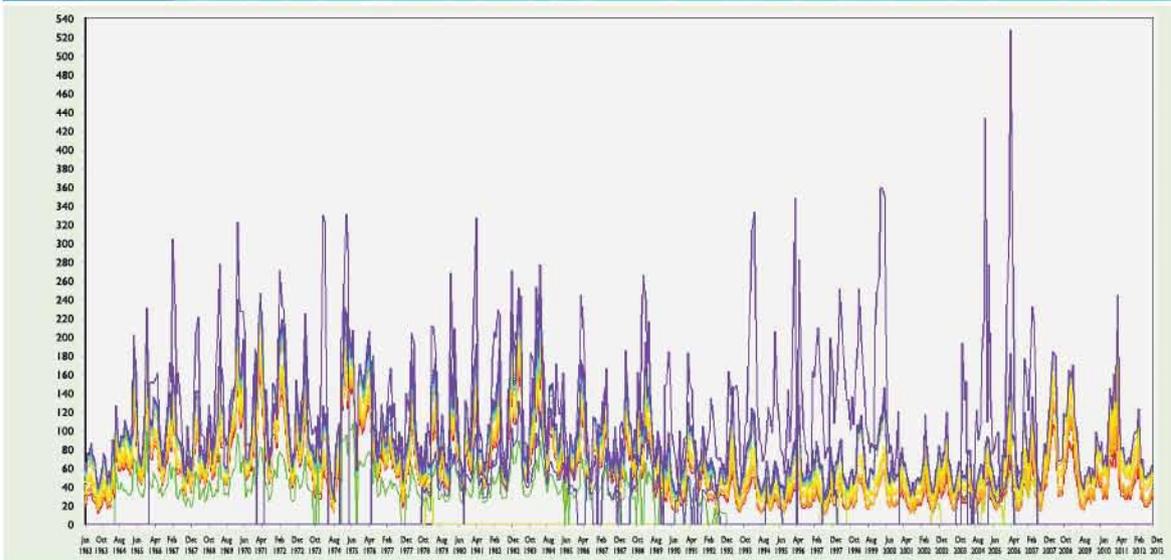
**Fuente:** Vera, A. Programa Gestión del Agua - FONAG

**Nota:** NSE: Índice de Eficiencia Nash- Sutcliffe; PBIAS: Sesgo porcentual; RMSE: Raíz cuadrada del error medio; R: Coeficiente de determinación.

Los resultados de las primeras corridas, además de cuantificar la disponibilidad de agua por unidad hídrica, permiten identificar la distribución espacial y los periodos de tiempo de demanda del recurso hídrico en cada *catchment* de cada unidad hídrica del área de estudio, ver Figura 8 y Figura 9, y por ende apoya al tomador de decisiones a la categorización y priorización de las zonas y los planes de intervención, en favor de un desarrollo sustentable con enfoque de cuencas hidrográficas.

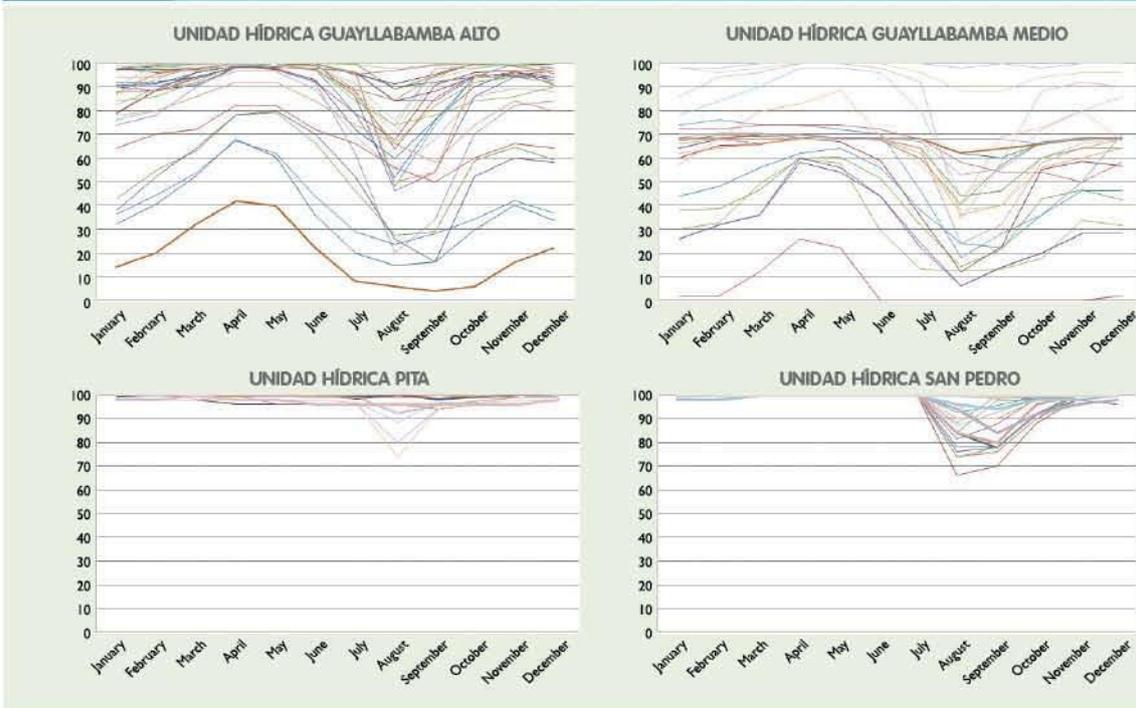


**FIGURA 8:** Caudal simulado medio mensual interanual en los catchments de la cuenca alta del río Guayllabamba. Escenario de referencia [1963 - 2012]



Fuente: Vera, A. Programa Gestión del Agua - FONAG

**FIGURA 9:** Porcentaje de cobertura de la demanda de agua, media mensual interanual por unidades hídricas [1963 - 2012]



Fuente: Vera, A. Programa Gestión del Agua - FONAG



El desarrollo de la simulación hidrológica en WEAP indica, en su fase preliminar, que las unidades hídricas Guayllabamba Alto y Guayllabamba Medio presentan fluctuaciones importantes a nivel temporal y de distribución en la cobertura de demanda. En la época seca, la cobertura de demanda desciende de forma drástica al punto de ser nula en algunas zonas, principalmente en las áreas rurales cercanas a grandes asentamientos poblados dentro de los *catchments* de estas dos unidades hídricas.

El punto de quiebre de la fase de calibración es la identificación de la sensibilidad en el grado de predicción de la simulación hidrológica marcado por la relación entre el conjunto de variables deterministas y las variables asumidas que debe suplir la información de puntos de control inexistentes. Los valores máximos del NSE alcanzan valores promedio de 0.55 que a criterio de los especialistas del FONAG no garantiza el grado de confianza de los resultados iniciales y por ende de las interpretaciones que se puedan verter.

La ausencia de puntos de control hidrológico en las unidades hídricas orientales aportantes de agua para Quito limitan la validación de la caracterización hidrológica en este espacio, y a pesar que el flanco occidental del área de estudio cuenta con varios puntos de control, no son suficientes para alcanzar un monitoreo y control eficiente. Una red de monitoreo y control hidrológico implementada con base en estudios similares a los generados por la Secretaria General de la Comunidad Andina SGCA, Ministerio de Ambiente MAE y FONAG (2011), garantizarían una cobertura y distribución estratégica con enfoque integrado y la reducción de incertidumbres en los resultados de cualquier simulación hidrológica que se aplique a la zona de estudio.

La validación y resultados finales de la simulación hidrológica reconocerán las fuentes que ocasionan los problemas de demanda insatisfecha, que en ciertos casos pueden responder a la disponibilidad de agua o al cambio de políticas de distribución de recursos hídricos. En la fase subsiguiente de la simulación hidrológica se incluirá estas consideraciones y se prevé incluir procesos para estimar las proyecciones de oferta y demanda de agua a corto, mediano y largo plazo, en función de la variabilidad climática, cambio climático y políticas de consumo de agua, así como el cálculo de índice de estrés hídrico por unidades hídricas.

La información generada en la simulación es pública y dinámica, y estará disponible en el SIRH-CG, [www.infoagua-guayllabamba.ec](http://www.infoagua-guayllabamba.ec), una vez concluya la investigación.

## Bibliografía |

- NASH Y SUTCLIFFE. River flow forecasting through conceptual models part I. A discussion of principles. *Journal of Hydrology*. 1970, vol 10, núm. 3, p. 282-290.
- POUYAUD, B.; YERRÉN, J.; ARBOLEDA, J.; SUAREZ, W. "Variabilidad Pluviométrica, a escalas anual y cuatrimestral, en la vertiente peruana del Océano Pacífico". Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología SENAMHI e Instituto de Investigación para el Desarrollo IRD. Perú. 2001.
- PURKEY, D.; JOYCE, B.; VICUNA, S.; HANEMANN, M.; DALE, L.; YATES, D.; DRACUP, J. "Robust Analysis Of Future Climate Change Impacts On Water For Agriculture And Other Sectors: A Case Study In The Sacramento Valley". *Climatic Change*. 2008, vol 87, núm. 1, p. 109-122.
- Secretaría General de la Comunidad Andina, Ministerio del Ambiente (Ecuador)/ Proyecto de Adaptación al Impacto del Retroceso Acelerado de Glaciares en los Andes Tropicales (PRAA), Fondo para la Protección del Agua (FONAG), 2011. Diseño de la Red de Monitoreo Hidrológico en las Microcuencas de los ríos Pita, San Pedro, Papallacta y Antisana. Quito, EC. 153p.
- SENAGUA, Secretaría del Agua. *Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua. Segundo Suplemento*. Disponible en línea: [www.agua.gob.ec](http://www.agua.gob.ec). 2014.
- SEI, Stockholm Environment Institute. Water Evaluation and Planning system WEAP. Disponible en línea: [www.weap21.org](http://www.weap21.org)
- TNC, The Nature Conservancy. Mapa de cobertura vegetal y uso de suelo generado para el ámbito de trabajo del FONAG, 1:50000. Disponible en línea: [www.infoagua-guayllabamba.ec](http://www.infoagua-guayllabamba.ec). 2007.
- UICN, Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza. *Manual de procedimientos para la delimitación y codificación de unidades hidrográficas de América del Sur*. Quito Ecuador. 2008.
- YATES, D.; SIEBER, J.; PURKEY, D.; HUBER – LEE, A.; GALBRAITH H. "WEAP21 – Part 2: Aiding Freshwater Ecosystem Service Evaluation". Water International. 2005, vol 30, núm. 4, p. 501-512.
- YATES, D.; SIEBER, J.; PURKEY, D.; HUBER – LEE, A. "WEAP21 – A demand, priority, and preference driven water planning model: part 1, model characteristics". Water International. 2005, vol 30, núm. 4, p. 487–500.
- YATES, D.; PURKEY, D.; SIEBER, J.; HUBER-LEE, A.; GALBRAITH, H.; WEST, J.; HERROD – JULIUS, S.; YOUNG, C.; JOYCE, B.A.; AL RAEY, M. "A Physically-Based Water Resource Planning Model for the Sacramento Basin, California USA using WEAP 21". Water Resources Planning and Management. 2008.