

# MODELO INTEGRADO DE GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS PARA LA EVALUACIÓN DE IMPACTOS DE SEQUÍA, CAMBIO CLIMÁTICO Y DESARROLLO HÍDRICO EN UNA CUENCA ÁRIDA ALTAMENTE REGULADA

Jorge Peña-Arancibia<sup>1</sup>, Hongxing Zheng<sup>1</sup>, Rodrigo Rojas<sup>1</sup>, Dave Penton<sup>1</sup>, Vianney Torres Alferez<sup>2</sup>, Carlos Cambillo<sup>3</sup>, Zenón Pacoricona<sup>2</sup>, José Valencia<sup>3</sup> y Neil Lazarow<sup>1</sup>

<sup>1</sup>CSIRO Land and Water, GPO Box 1700, Canberra ACT 2601 Australia,

<sup>2</sup>Proyecto Especial Tacna.

<sup>3</sup>Secretaría Técnica Consejo de Recursos Hídricos de Cuenca Caplina-Locumba

E-mail: Jorge.PenaArancibia@csiro.au

## Descripción general

Localizada en la cabecera del desierto de Atacama en el sur del Perú, la Cuenca Caplina-Locumba (16389 km<sup>2</sup>, Figura 1) presenta una gama de desafíos para la gestión sostenible de recursos hídricos. Los recursos hídricos superficiales de la cuenca Caplina-Locumba son limitados durante condiciones climáticas típicas, situación que empeora durante sequías severas presentando déficits hídricos aún más agudos. Durante períodos de baja precipitación, la escasez de agua puede afectar a una amplia gama de usuarios (consumo humano, agricultura y minería), incluidas las aproximadamente 25000 ha bajo riego. Para subsanar situaciones temporales de déficit, la cuenca se encuentra altamente regulada, contando con trasvases intercuenas, embalses de limitada capacidad y aportes de aguas subterráneas desde el acuífero de El Ayo en la zona alto-andina (precipitación de ~400 mm por año) a la ciudad de Tacna (346 013 habitantes) y al valle de Tacna (2067 ha de riego).

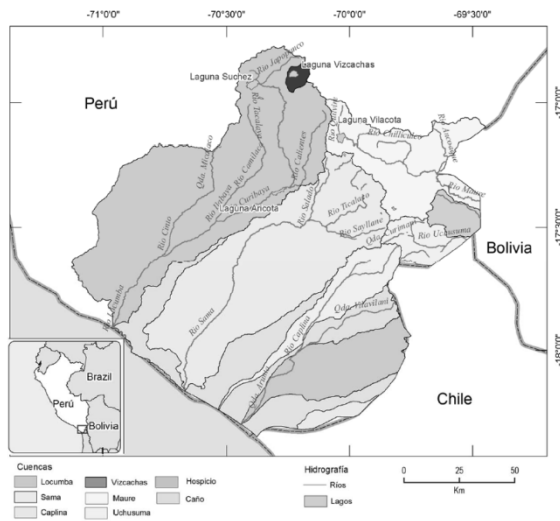


Figura 1.- Localización geográfica, cuencas y ríos principales.

El monitoreo de caudales, volúmenes en embalses y nivel piezométrico en acuíferos, así como el pronóstico de cambios potenciales en éstos (clima, desarrollo de infraestructura), y las acciones de mitigación que reduzcan los impactos en los usuarios, son parte fundamental de una gestión integral de recursos hídricos. Un modelo hidrológico adecuadamente calibrado apunta a una toma de decisiones efectiva y eficiente bajo las condiciones de estrés hídrico que registra la cuenca Caplina-Locumba. El presente artículo describe el desarrollo e implementación de un Modelo de Gestión de Recursos Hídricos (MGRH) para la cuenca Caplina-Locumba. El MGRH: (i) describe adecuadamente la hidrología del sistema de recursos hídricos para un clima variable, (ii) incluye acuerdos o reglas (existentes o potenciales) de reparto de agua, (iii) representa la operación de la infraestructura (existente o potencial) y (iv) describe la gestión de la demanda, por ejemplo, incluyendo mejoras en la eficiencia del uso del agua.

## Modelo de gestión de recursos hídricos

El MGRH para el sistema superficial se ha construido en la plataforma integrada de modelación hidrológica SOURCE (<http://ewater.org.au/products/ewater-source/>, Welsh et al., 2013). El desarrollo del MGRH para el sistema superficial incluye la modelación de la escorrentía superficial mediante: (i) un modelo de precipitación-escorrentía y, (ii) un modelo de sistema fluvial que incluye las características físicas naturales y las obras de regulación/conducción (embalses, tomas, canales, etc.) y de gestión (reglas de operación) de la Cuenca Caplina-Locumba. El MGRH se conceptualizó utilizando un esquema de nodo-enlace. Los nodos considerados incluyen puntos de control tales como estaciones hidrométricas, bocatomas, embalses, canales, confluencias, túneles y trasvases. El MGRH ha sido enlazado con el modelo MODFLOW del acuífero alto-andino de El Ayo el cual suministra aguas subterráneas hacia Tacna. La operación de ambos modelos ha sido verificada mediante valores coherentes y comparables para ciertos componentes del balance hídrico como la evapotranspiración, y las potenciales pérdidas y recuperaciones del río Uchusuma que subtiende el acuífero de El Ayo.

Los tipos de nodos utilizados en SOURCE permiten representar distintas configuraciones y se utilizan de acuerdo a la finalidad de la estructura hidráulica o punto de control a representar. Los nodos utilizados en SOURCE se dividen en aportantes (estación hidrométrica, escorrentía), conectores (partidores, confluencias), demandantes (usuario, captación, requerimientos ambientales) y de almacenamiento (embalses, diques, lagos, bofedales). El modelo SOURCE de la Cuenca Caplina-Locumba cuenta con 576 enlaces y 867 nodos (Figura 2).

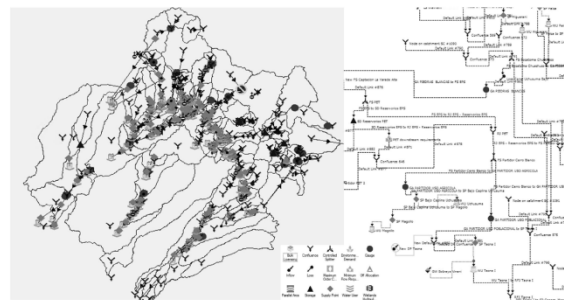


Figura 1.- Red-nodo enlace y ejemplo de ésta en esquema conceptual.

## Implementación

El MGRH se implementó a escala temporal diaria. La calibración, parametrización y restricción del MGRH se realizó utilizando caudales observados, volúmenes en embalses, datos de uso de agua (o licencias). Los resultados de la calibración definen las condiciones de línea base en simulación. Se fijó un periodo de calibración desde 1996 hasta 2011. Se escogió el año 1996 debido a que algunas estructuras hidráulicas mayores comenzaron a operar desde ese año. La calibración se limitó al año 2011 debido a que la mayoría de las series temporales de

precipitación diarias proporcionadas culminan sus registros en dicho año. La simulación se realizó desde 1981 hasta 2011, reflejando las reglas de operación *actuales*. Para este fin se discretizó la Cuenca Caplina-Locumba en 101 subcuencas utilizando puntos de control (estaciones hidrométricas, bocatomas, embalses, canales, confluencias, túneles y trasvases) para definir los límites de éstas.

El sistema fluvial se calibró por tramos, es decir, entre puntos de control donde se cuenta con registros históricos de estaciones hidrométricas, verificando que los caudales simulados sean reproducidos satisfactoriamente en términos de sincronización y volumen. Se verificó que el comportamiento de los embalses, partidores de caudal y usuarios de agua representen las reglas de operación y los usos esperados. Los resultados de la calibración se presentan en la Tabla 1. La calibración se puede considerar exitosa con un promedio de NSE de 0.46 (-0.70–0.85) y un sesgo de -3.79% (-39.26–28.64). Sin la inclusión de aquellas estaciones altamente reguladas el NSE promedio aumenta a 0.59. En el caso de las estaciones utilizadas para la calibración del modelo de precipitación-escorrentía el promedio de NSE es de 0.74 (0.62–0.85) y el sesgo de 2.25% (-23.31–28.64). Como se anticipa, en estaciones donde las reglas de operación históricas son diferentes a las actuales fue muy difícil poder reproducir los caudales observados.

Tabla 1.- Resultados de la calibración (1996–2011) del modelo SOURCE en las estaciones hidrométricas del ámbito.

Estación hidrométrica	r	Sesgo (%)	NSE
Aricota	0.75	4.42	0.5
Aruma	0.83	-39.26	0.54
Bocatoma Uchusuma*	0.68	11.69	0.06
Calientes	0.84	-6.97	0.69
Canal Ite*	0.47	10.57	-0.7
Candarave	0.69	-20.74	0.42
Chuupalca	0.69	-9.74	0.44
Confluencia CS	0.78	-13.78	0.57
Coranchay <sup>#</sup>	0.85	5.86	0.62
Coruca	0.82	-15.34	0.61
EL Cairo	0.85	-3.45	0.72
Ichicollo	0.80	10.67	0.55
Japopunco <sup>#</sup>	0.93	-23.31	0.85
Kovire <sup>#</sup>	0.87	28.64	0.74
La Frontera	0.69	-17.66	0.41
La Tranca	0.92	-2.35	0.83
Piedras Blancas*	0.67	-2.50	-0.03
Pistala	0.82	7.09	0.64
Puente Uchusuma*	0.57	-7.04	0.08
Puente Viejo	0.81	0.46	0.64
Qda. Honda	0.89	-8.85	0.74
Tacalaya <sup>#</sup>	0.85	-2.21	0.73
Ticapampa	0.66	6.53	-0.08

\* Estaciones hidrométricas con alta regulación, # estaciones donde se calibró el modelo de precipitación-escorrentía GR4J

En la Figura 3 se presentan ejemplos de hidrogramas observados y de calibración para ilustrar las prestaciones del MGRH. Como se puede apreciar, el modelo simula los caudales pico y de estiaje de forma adecuada con un sesgo bajo, generalmente.

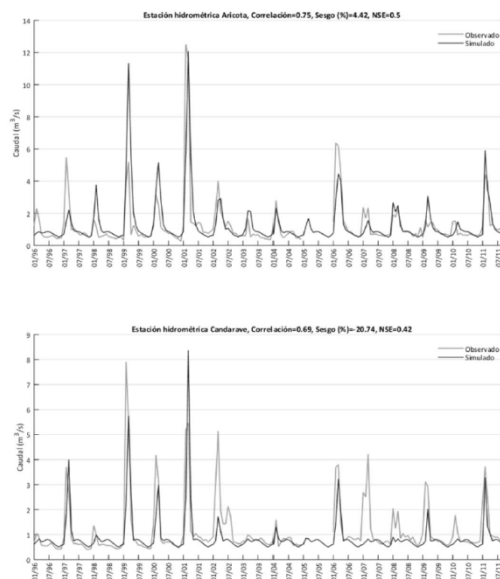


Figura 3.- Hidrogramas observados y simulados.

### Escenarios operacionales y estratégicos

El MGRH calibrado fue utilizado para evaluar impactos potenciales del cambio climático, desarrollo de infraestructura y mejora de la eficiencia de riego. Asimismo se exploraron alternativas de operación en embalses de suministro a la ciudad de Tacna con el fin de reducir las extracciones de aguas subterráneas (PGS-A y PGS-B con una operación mejorada). En la Figura 4a se puede observar que el embalse Paucarani se encuentra generalmente más vacío (0.5 Hm<sup>3</sup> en promedio) en el escenario PGS-B que en PGS-A, situación que reduce las pérdidas por evaporación manteniéndose volúmenes mayores a 4 Hm<sup>3</sup> aún en las condiciones secas. En cuanto a las extracciones desde el acuífero de El Ayro (Figura 4b), generalmente PGS-B resulta en menores volúmenes explotados comparado con PGS-A, particularmente, durante condiciones promedio a húmedas. A pesar de esto, se registra un leve descenso del nivel piezométrico del acuífero en ambos escenarios.

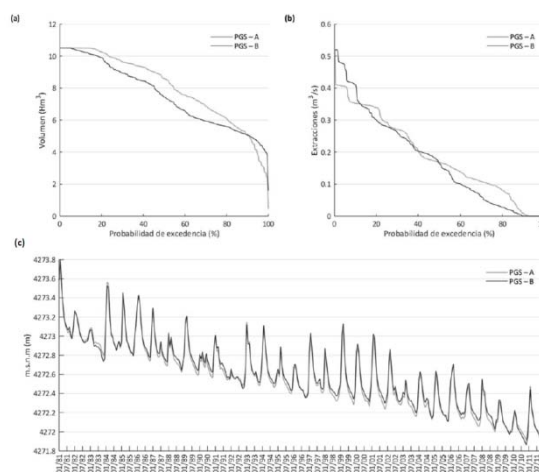


Figura 4.- Probabilidad de excedencia para (a) volumen en la represa Paucarani y (b) extracciones del acuífero y (c) niveles piezométricos del acuífero alto-andino de El Ayro

### Referencias bibliográficas

Welsh, W.D., Vaze, J., Dutta, D., Rassam, D., Rahman, J.M., Jolly, I.D., Wallbrink, P., Podger, G., Bethune, M., Hardy, M.J., Teng, J. and Lerat, J. (2012). An integrated modeling framework for regulated river systems. *Environ. Model. Softw.*, 39 (2013), pp. 81-102