

**XXIV CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
PUNTA DEL ESTE, URUGUAY, NOVIEMBRE 2010**

**UTILIZACIÓN DE UN MODELO HIDRODINÁMICO EN LA GESTIÓN DE
LAS RESERVAS DE UN SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE AGUA
POTABLE**

Alonso R., López G., Teixeira L. y Chreties C.

Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental, Universidad de la República, Uruguay.

ralonso@fing.edu.uy, glopez@fing.edu.uy, luistei@fing.edu.uy y chreties@fing.edu.uy

RESUMEN:

En este artículo se presenta la metodología empleada y los resultados obtenidos en la implementación de un modelo hidrodinámico del sistema fluvial que abastece de agua potable a la ciudad de Montevideo y su región metropolitana, bajo la plataforma de base que proporciona el software HEC-RAS 4.0. El modelo calibrado y validado constituye una herramienta robusta y de fácil aplicación para la gestión de los recursos hídricos de una de las principales cuencas del país, lo que se muestra en este artículo a partir de los resultados del mismo. Su utilidad radica en que a partir de la incorporación de los registros y pronósticos hidrométricos y pluviométricos, se puede simular distintos escenarios de erogación de agua desde las reservas, para luego optar por el modo de operación que garantice la satisfacción de la demanda y minimice el desaprovechamiento del agua erogada. Se han determinado distintas consignas de operación de la reserva de agua de la represa de Paso Severino para asegurar un correcto abastecimiento de agua potable a Montevideo, a partir de su simulación en el modelo implementado.

ABSTRACT:

A hydrodynamic model of the rivers system that supplies fresh water to Montevideo city was developed using the software HEC-RAS 4.0. The model was calibrated and validated and it is proposed to be used to improve water resource management of one of the major watershed of the country. The way to use it is: update new hydrometric and pluviometric data, simulate different reservoir management alternatives and choose the one that meets water demand while minimize waste of water.

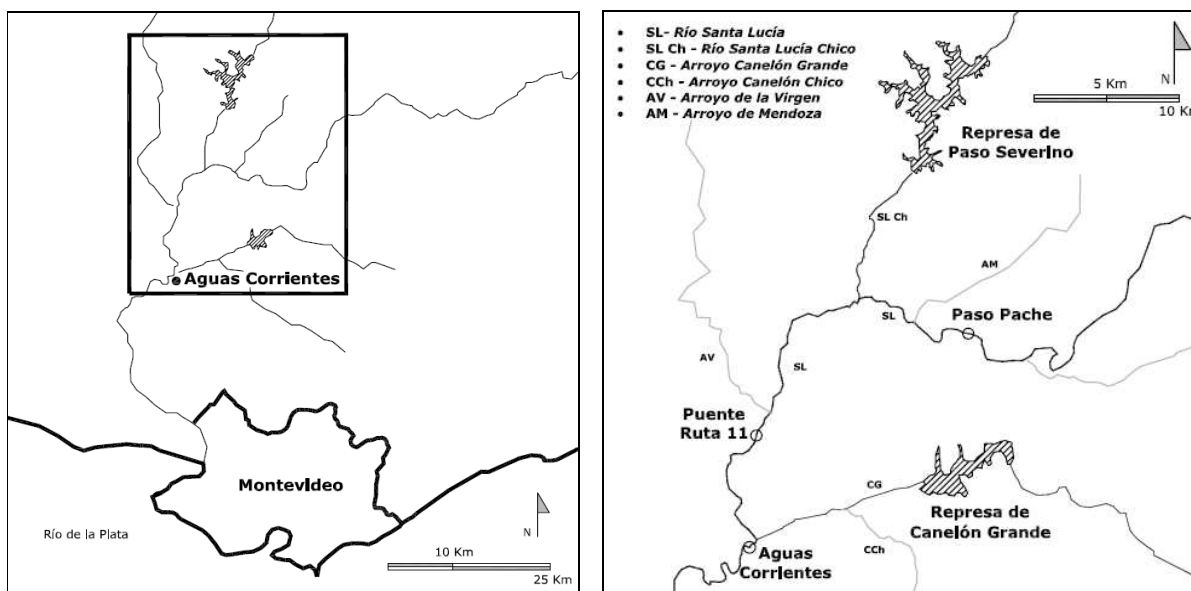
PALABRAS CLAVES:

Modelo hidrodinámico, Gestión de los recursos hídricos, Río Santa Lucía.

INTRODUCCIÓN

El sistema de abastecimiento de agua potable de Montevideo y su zona metropolitana cuenta con una planta de potabilización y bombeo ubicada en la localidad de Aguas Corrientes (Figura 1). La planta cumple íntegramente el proceso de potabilización del agua que consume la capital del país y gran parte del departamento de Canelones, tratando diariamente entre 0.5 y 0.7 Hm³ de agua bruta dependiendo de la época del año. De esta forma cubre la necesidad de brindar un abastecimiento seguro de agua de excelente calidad, las 24 horas del día, los 365 días del año, a una población de 1.700.000 habitantes. La empresa que tiene a su cargo, entre otras competencias, el abastecimiento de agua potable en todo el territorio uruguayo es la empresa estatal OSE (Obras Sanitarias del Estado).

La fuente de agua bruta del sistema de abastecimiento de agua potable es la cuenca del río Santa Lucía. Esta cuenca tiene un área de 9321 km² localizando el punto de cierre en Aguas Corrientes, la pendiente por extremos es 0.15% mientras que el tiempo de concentración calculado con la fórmula de Kirpich (1940) es 49.3 horas. Los cursos fluviales principales que la componen son los ríos Santa Lucía y Santa Lucía Chico. El tramo modelado del río Santa Lucía consta de 37 km. de longitud comprendidos entre Paso Pache y la represa de Aguas Corrientes, mientras que el correspondiente al río Santa Lucía Chico es de 12 km. que se extienden entre Paso Severino y su desembocadura en el río Santa Lucía. Además de estos dos cursos, al sistema fluvial definido en el modelo también lo integra un tramo de 20 km de longitud del arroyo Canelón Grande que se extienden desde la represa Canelón Grande a la confluencia con el río Santa Lucía. Los afluentes arroyo de Mendoza, arroyo de la Virgen y arroyo Canelón Chico, si bien son cursos fluviales de menor entidad, también fueron considerados pues comprenden la cuenca inmediata de Aguas Corrientes (Figura 1).



El sistema cuenta con dos obras hidráulicas que han sido construidas como reserva de agua bruta y permiten la gestión del recurso hídrico con el objetivo principal de garantizar el abastecimiento de la planta de Aguas Corrientes. Las obras que permiten la gestión son las represas de Canelón Grande y de Paso Severino. La represa de Paso Severino por sus características y dimensiones es la principal reserva de agua bruta y es la que se opera sistemáticamente para la gestión del sistema. Es una represa de materiales sueltos con un vertedero central de hormigón y una capacidad útil de almacenamiento de 67 Hm³. El sistema de válvulas se encuentra 14.5 metros debajo de la cota de

vertido permitiendo erogar el agua cuando lo demanda la planta de Aguas Corrientes que se encuentra 37 km aguas abajo

A partir de la sequía registrada a fines de 2008 e inicio de 2009, OSE emprendió varias actividades con el objetivo de optimizar la gestión de los recursos hídricos en la cuenca del río Santa Lucía. En ese sentido, ha impulsado la generación de herramientas que brinden apoyo a la operación de las reservas de agua bruta de la zona metropolitana, en particular de su principal reserva: la represa de Paso Severino.

La implementación de modelos matemáticos fortalece la base de información y conocimiento sobre la cual sustentar la toma de decisiones implicadas en la gestión de los recursos hídricos (Wurbs, 1994). En esta línea se ha desarrollado un modelo hidrodinámico de los ríos Santa Lucía, Santa Lucía Chico y el arroyo Canelón Grande, cuya finalidad es orientar sobre la toma de decisiones para afrontar épocas de sequía.

En este artículo se presenta la metodología empleada y los resultados obtenidos en el desarrollo del modelo hidrodinámico. Entre los resultados que se presentan se incluye un ejemplo de aplicación del modelo y se realizan recomendaciones acerca de su utilización.

MATERIALES Y MÉTODOS

La modelación hidrodinámica del sistema fluvial Santa Lucía se implementó a partir del software Hec Ras 4.0, desarrollado por la US Army Corps of Engineers. Este programa permite modelar un flujo no estacionario unidimensional a partir de la resolución numérica de las ecuaciones de Saint-Venant en base a un esquema implícito en diferencias finitas (Brunner, 2008). La implementación del modelo requiere definir la geometría del sistema fluvial analizado y las condiciones hidrodinámicas que se emplearán como condición inicial y como condiciones de borde.

La geometría del modelo fue definida a partir de **información topo-batimétrica** recopilada o relevada en diversas campañas, cubriendo con espaciamiento adecuado toda la zona de estudio.

Las secciones transversales utilizadas para definir la geometría del sistema fluvial modelado fueron obtenidas a partir de las siguientes fuentes:

- Relevamiento de campo realizado en 2009.
- Relevamientos realizados con anterioridad (año 1999), incluidos en el Plan Director de Agua Potable de OSE.
- Relevamientos realizados por OSE, en el año 2006 en la zona del embalse de la planta de Aguas Corrientes.
- Relevamientos realizados por la Dirección Nacional de Vialidad (DNV) para el estudio del By-Pass de Ruta 11 con fecha Octubre 2005
- Cartas 1:50.000 del Servicio Geográfico Militar (SGM)

Se implementó una geometría base a partir de las secciones transversales relevadas en 2009, complementadas con las curvas de las cartas del SGM y el relevamiento realizado por OSE en el 2006 en la zona del embalse de Aguas Corrientes. A esta geometría base se le fue agregando información de los otros relevamientos, corroborando previamente la consistencia de dicha información. La consistencia de las secciones transversales agregadas fue evaluada comparándolas con las de la geometría base. El resultado indica que las distintas fuentes de información geométrica son totalmente consistentes.

La base de la implementación geométrica (relevamiento de campo realizado en 2009) consta de 73 perfiles transversales distribuidos en los ríos Santa Lucía y Santa Lucía Chico y el arroyo Canelón

Grande. Estas secciones transversales contienen y poseen un buen detalle del cauce principal de dichos cursos. Las secciones transversales correspondientes al río Santa Lucía son 48 y se encuentran en el tramo del río limitado aguas arriba por la Ruta Nacional N° 5 y aguas abajo por la represa de Aguas Corrientes. Las correspondientes al río Santa Lucía Chico son 16 y se encuentran en el tramo comprendido entre la represa de Paso Severino y la confluencia con el río Santa Lucía. Mientras que 9 son las secciones relevadas en el arroyo Canelón Grande entre la represa y la confluencia con el Santa Lucía.

El esquema del modelo con las secciones transversales consideradas y la ubicación de las estaciones hidrométricas que proporcionaron los datos utilizados se presentan en la Figura 2.

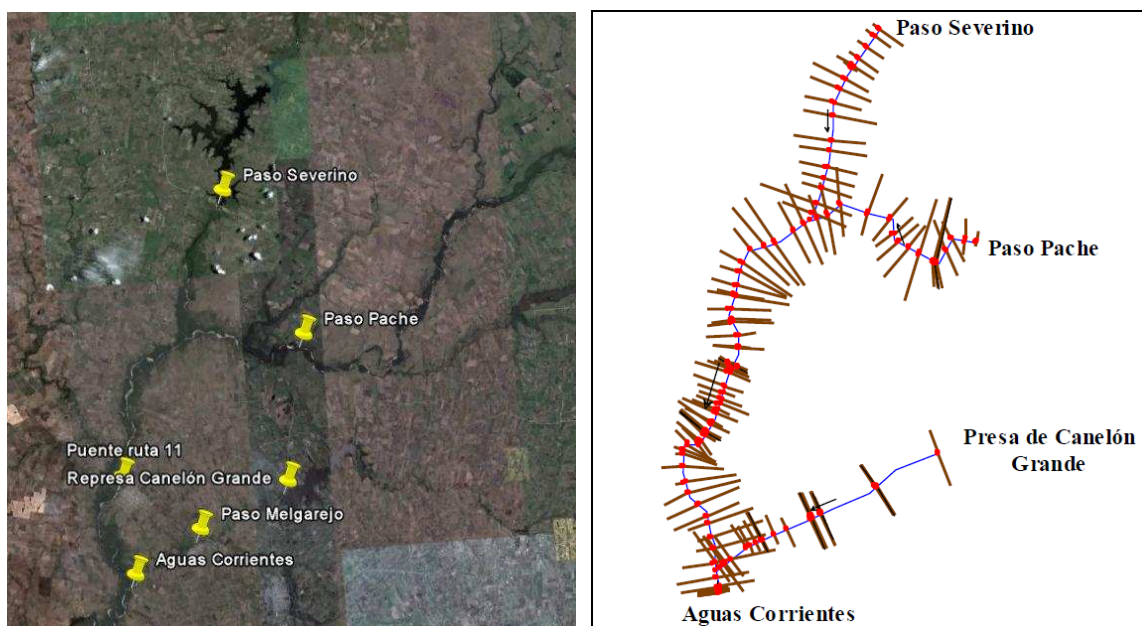


Figura 2 .- Ubicación de las estaciones hidrométricas (izquierda). Secciones transversales que definen la geometría del modelo (derecha)

Las **estaciones hidrométricas** de las cuales se obtuvieron los datos utilizados como condición de borde y para la calibración y verificación de los resultados del modelo son: Paso Pache, Paso Severino, Puente Ruta Nacional N°11, Represa Canelón Grande, Paso Melgarejo y Aguas Corrientes. La ubicación de cada estación se presenta en la Figura 2, mientras que las magnitudes medidas en cada una se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1.- Series de datos hidrométricos disponibles

Estación	Cauce	Variable
Paso Pache	Río Santa Lucía	H y curva de aforo
Ruta Nacional N° 11	Río Santa Lucía	H y curva de aforo
Aguas Corrientes	Río Santa Lucía	H y curva de aforo
Paso Severino	Río Santa Lucía Chico	H y apertura de válvulas
Presas Canelón Grande	Arroyo Canelón Grande	H
Paso Melgarejo	Arroyo Canelón Grande	H

Cada serie de datos fue procesada a los efectos de determinar los períodos de datos faltantes y la frecuencia de toma de datos en cada una de las series. Los datos de Paso Severino, Paso Pache, Canelón Grande y Aguas Corrientes son utilizados como condición de borde, mientras que los datos de Ruta Nacional N° 11 y Paso Melgarejo sirven para ajustar el modelo.

Las condiciones de borde fijadas aguas arriba fueron hidrogramas en los tres cauces modelados, mientras que como condición de borde aguas abajo se fijó la curva de aforo del vertedero de la represa de control de niveles de la planta potabilizadora de Aguas Corrientes. Las curvas de aforo en el puente sobre Ruta Nacional N°11 y los niveles en la planta de Aguas Corrientes fueron utilizados en el ajuste de los coeficientes de calibración y en la verificación del modelo.

Los afluentes, arroyo de la Virgen, arroyo de Mendoza y arroyo Canelón Chico, fueron considerados en el modelo como condición de borde lateral. En el punto de confluencia de cada uno de estos afluentes con los cauces modelados se fijó un hidrograma definido a partir del hidrograma condición de borde en Paso Pache disminuido, en cada caso, por un factor que considera la relación entre los parámetros hidrológicos de la cuenca de los afluentes y la cuenca del Santa Lucía con cierre en Paso Pache.

En la Figura 3 se muestran las cuencas trazadas y en la Tabla 2 las principales características de las mismas.

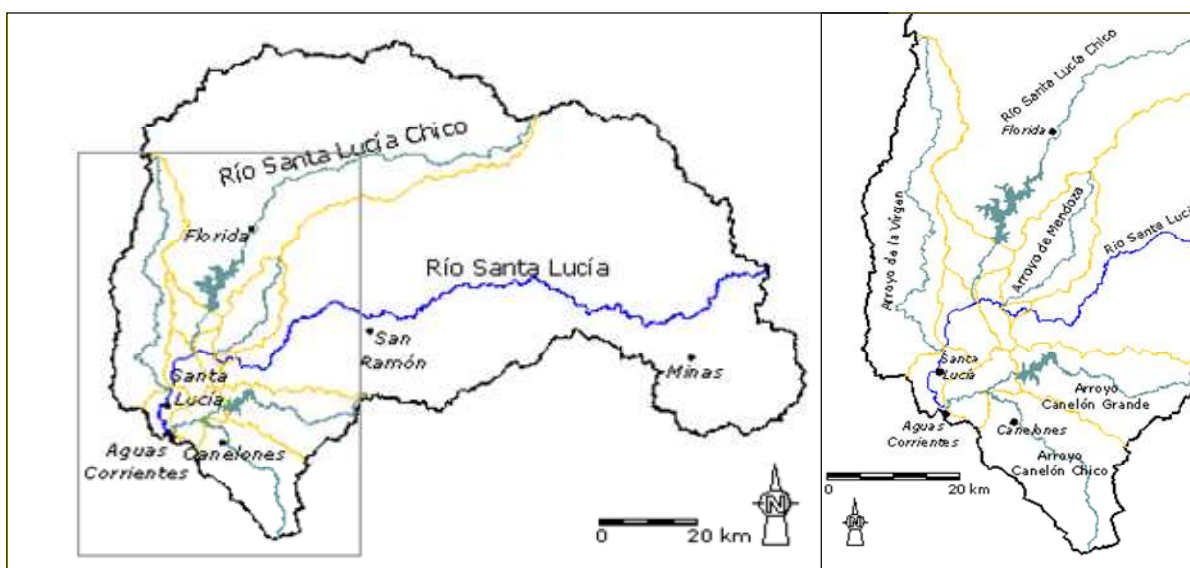


Figura 3.- Cuencas de aporte al sistema fluvial estudiado

Tabla 2.- Principales características de las cuencas de aporte al sistema

Cauce	Pto. de cierre	Área (km ²)	$\Delta H(m)$	L(Km)	S(%)	Tc(horas)
Río Santa Lucía	Aguas Corrientes	9231.1	310.4	203.0	0.153	49.3
Río Santa Lucía	Paso Pache	4988.8	303.5	165.9	0.183	39.4
Río Santa Lucía Chico	Paso Severino	2507.0	205.8	110.5	0.186	28.6
A° Canelón Grande	Presa Canelón Grande	289.4	68.4	46.6	0.147	16.1
A° Canelón Grande	Desembocadura en el río Santa Lucía	734.1	80	66.7	0.120	23
A° Canelón Chico	Desembocadura en el a° Canelón Grande	364.5	65.0	50.6	0.128	18.1
A° de Mendoza	Desembocadura en el río Santa Lucía	190.2	100.0	36.8	0.272	10.6
A° de la Virgen	Desembocadura en el río Santa Lucía	522.2	165.0	84.1	0.196	22.7

Otra condición de borde lateral se consideró en Aguas Corrientes, donde se representó la toma de la planta potabilizadora como un hidrograma de aporte lateral con caudales negativos, que se corresponden con los caudales de toma de la planta. Estos caudales fueron definidos a partir de los consumos medios diarios mensuales calculados a partir de los registros de la planta en el período 2001-2009, cuyos resultados se presentan en la Figura 4. El promedio mensual obtenido, fue

considerado en la modelación, como un caudal constante durante todo el día y durante todo el mes correspondiente.

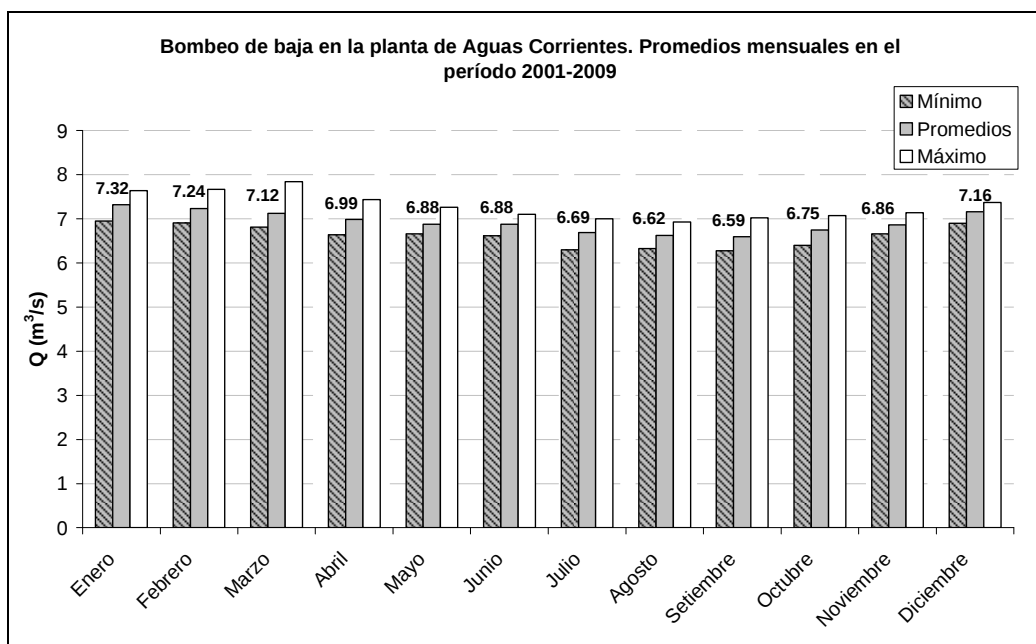


Figura 4 .- Bombeo de baja en la planta de Aguas Corrientes. Promedios mensuales en el período 2001-2009

Con el modelo implementado, se realizaron distintas simulaciones para analizar el tránsito entre la reserva de Paso Severino y la planta potabilizadora. Con los resultados obtenidos se fijaron recomendaciones para la utilización del modelo en la gestión del embalse.

El beneficio de incorporar esta herramienta en la gestión, fue cuantificado analizando y modelando distintas consignas de operación frente a diversos escenarios hidrológicos, en particular fue estimando el volumen vertido durante el período de sequía correspondiente al verano 2008-2009.

RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados de la calibración y verificación del modelo hidrodinámico implementado y la simulación de diversas consignas de gestión de la represa de Paso Severino para asegurar el bombeo en la toma de la planta potabilizadora de Aguas Corrientes.

Calibración y verificación del modelo

En primer lugar se presentan los resultados de la calibración del modelo con la curva de aforo en el puente de la Ruta Nacional N° 11 y la comparación de los niveles en Aguas Corrientes medidos y obtenidos como resultado del modelo.

La rugosidad está representada en el modelo mediante los coeficientes de rugosidad (números de Manning) que se definen para cauce y planicie de inundación de cada sección transversal. En el caso del tramo correspondiente al río Santa Lucía estos coeficientes fueron ajustados de forma de reproducir la curva de aforo del la estación Puente Ruta Nacional N°11. Para los tramos del río Santa Lucía Chico y del río Canelón Grande se fijaron los coeficientes hallados para el tramo del río Santa Lucía.

En la Figura 5 se presenta el ajuste realizado a partir de simular el período comprendido entre el 13/11/1997 y el 31/01/1999, 445 días. Período de gran extensión sin falta de datos en las condiciones de borde.

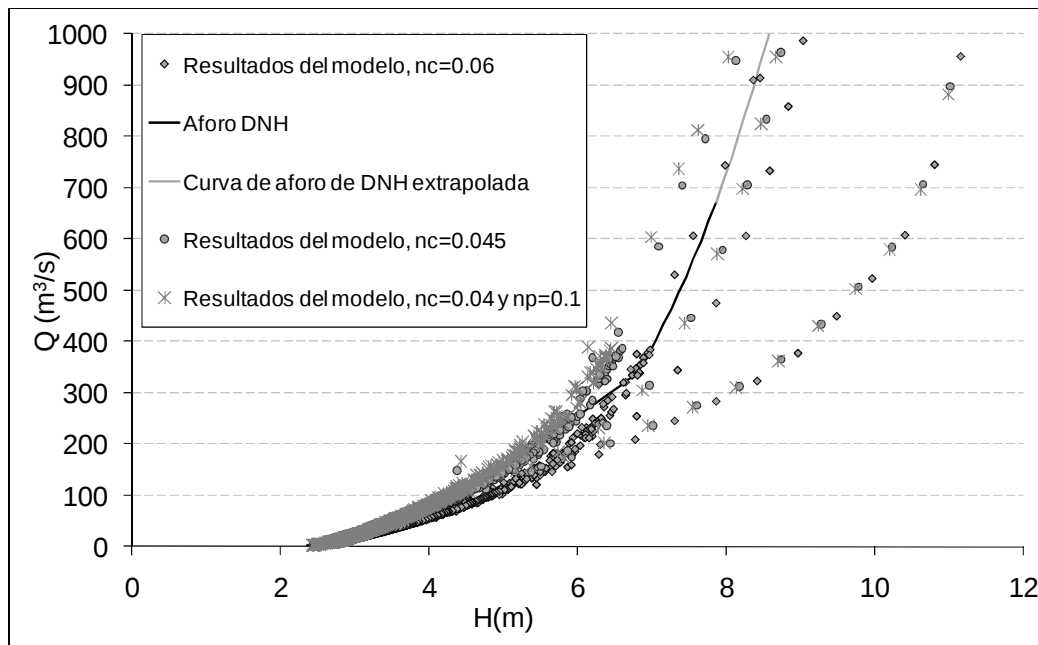


Figura 5 .- Ajuste de los coeficientes de rugosidad con la curva de aforo de la estación Ruta Nacional N°11

Como puede observarse los coeficientes que mejor ajustan son 0.04 para el cauce y 0.1 para la planicie de inundación. En la Figura 6 se muestran únicamente los resultados obtenidos para estos coeficientes, en donde se puede apreciar que la relación biunívoca nivel-caudal deja de valer a partir de un tirante correspondiente a un nivel de agua de 5 metros respecto al cero oficial (180 m³/s aproximadamente)

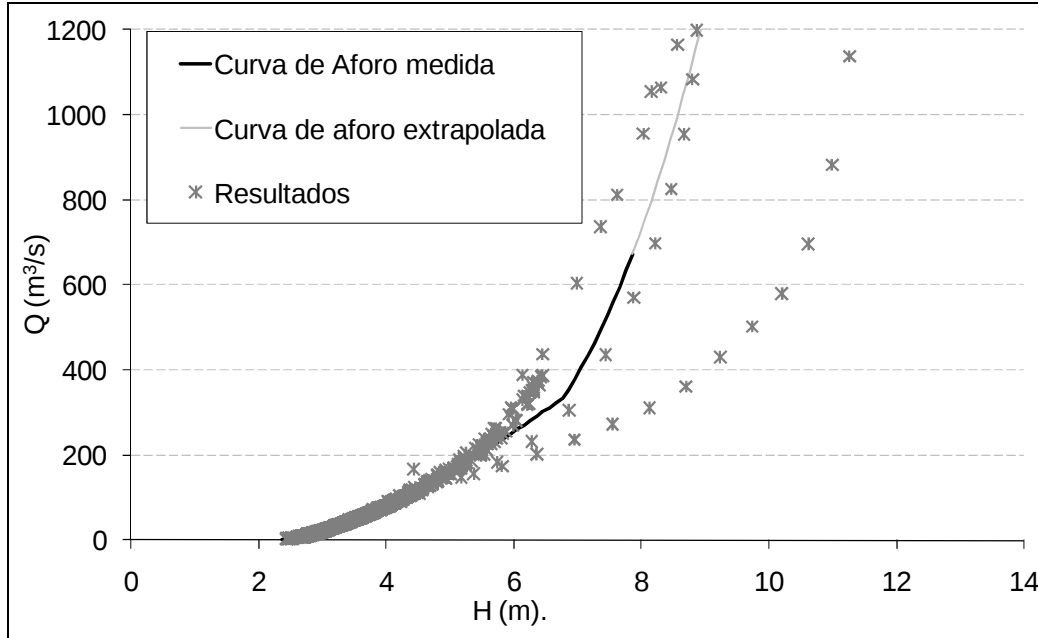


Figura 6 .- Resultados del modelo en el puente Ruta Nacional N°11 para $nc=0.04$ y $np=0.1$

En la Figura 7 se presentan, a modo de ejemplo, los resultados de niveles en el embalse de Aguas Corrientes obtenidos con el modelo y comparados con los datos medidos, para el período Noviembre 1997 – Febrero 1998.

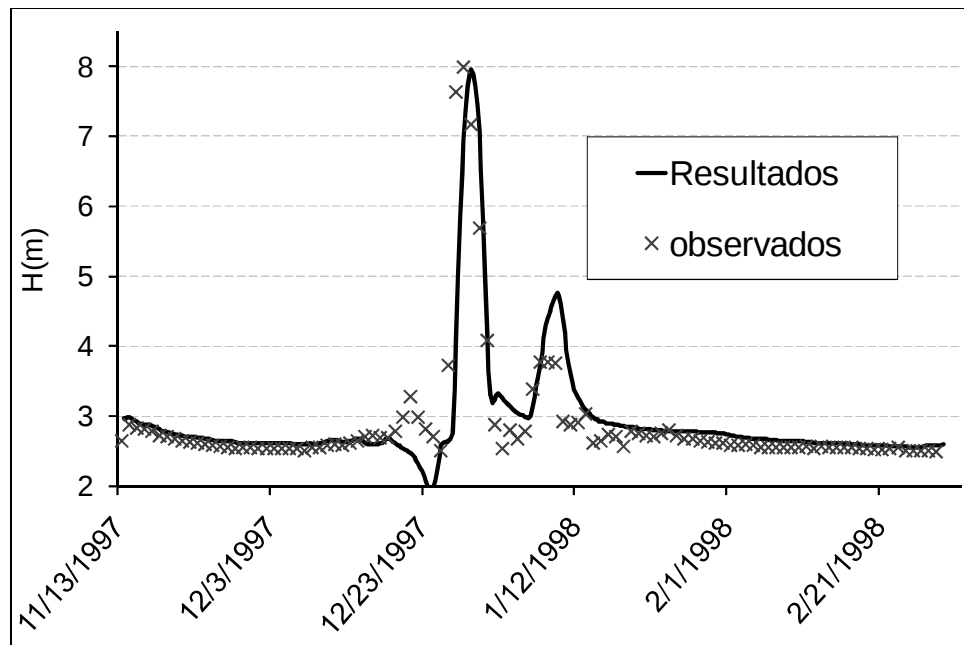


Figura 7 .- Comparación entre los resultados del modelo y los niveles medidos en el embalse de Aguas Corrientes. Período 13/11/1997 al 1/3/1998

En base a estos resultados, se considera que el modelo reproduce adecuadamente los parámetros hidráulicos de interés, resultando apropiado para estimar caudales y niveles en el sistema fluvial estudiado y por tanto puede ser utilizado como herramienta en la optimización de la gestión del embalse de Paso Severino.

Simulación de consignas de operación de la represa de Paso Severino

Con el objetivo de analizar distintas consignas de operación de la represa de Paso Severino se simuló el tránsito de distintas alternativas de las condiciones de borde de aguas arriba.

En primera instancia se estableció como condición de borde de aguas arriba una onda representativa de un cambio de caudal y se determinó el tiempo que tarda la onda en llegar a Aguas Corrientes y el tiempo que se tarda en alcanzar nuevamente una situación de régimen.

En la Figura 8 se muestran los resultados obtenidos de simular el tránsito de una onda positiva desde Paso Severino manteniendo un caudal constante en las otras condiciones de borde aguas arriba. La onda está definida por un caudal inicial casi nulo de $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ que pasa en 3 horas a un caudal final de $8 \text{ m}^3/\text{s}$. El caudal constante en Paso Pache y la represa de Canelón Grande fue fijado en $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ en ambos. Se observa que el tiempo transcurrido para que la onda comience a manifestarse en Aguas Corrientes es de 20 horas, mientras que la situación de régimen tarda 42 horas en establecerse.

En la Figura 9 se muestra el resultado de un análisis similar en que se simuló la propagación de una onda negativa desde Paso Pache, manteniendo constante el caudal en las otras condiciones de borde de aguas arriba. (Paso Severino y Canelón Grande). La onda está definida por un caudal inicial de $10 \text{ m}^3/\text{s}$ que decrece en 15 horas a un caudal final de $1 \text{ m}^3/\text{s}$. El caudal constante en Paso Severino y la represa de Canelón Grande fue fijado en $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ para ambos. Se observa que el tiempo transcurrido para que la onda comience a manifestarse en Aguas Corrientes es de 15 horas, mientras que la situación de régimen tarda 65 horas en establecerse.

Para ambos casos se aprecia el tiempo de tránsito de la onda hasta llegar a la planta de potabilización y la deformación de la misma. Estos dos aspectos varían con el caudal erogado y deben ser considerados en la gestión de la reserva.

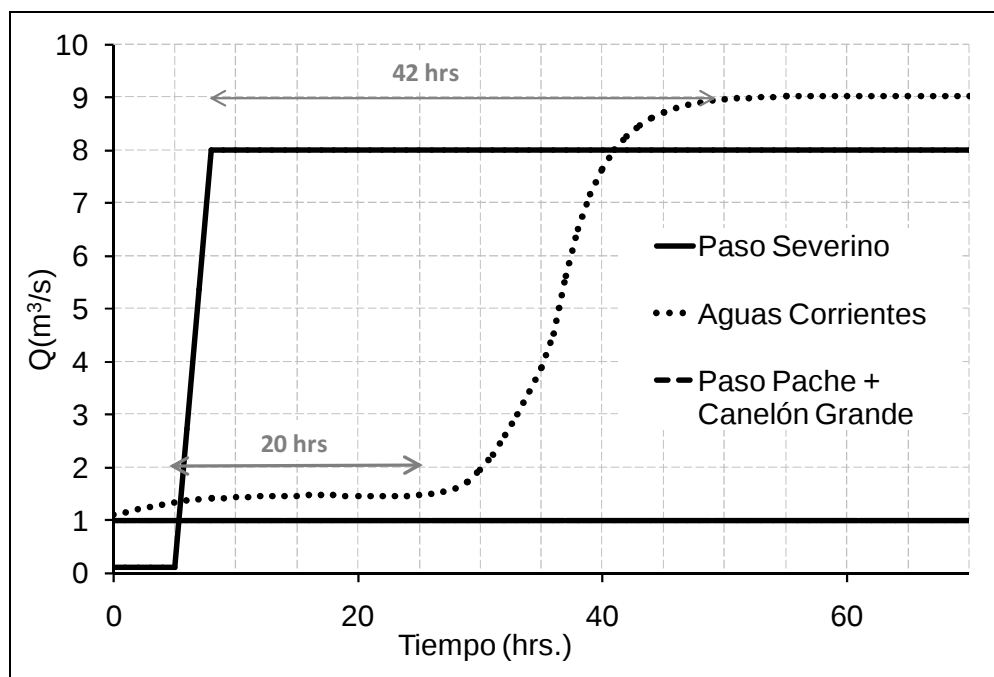


Figura 8 .- Tránsito de una onda progresiva desde Paso Severino

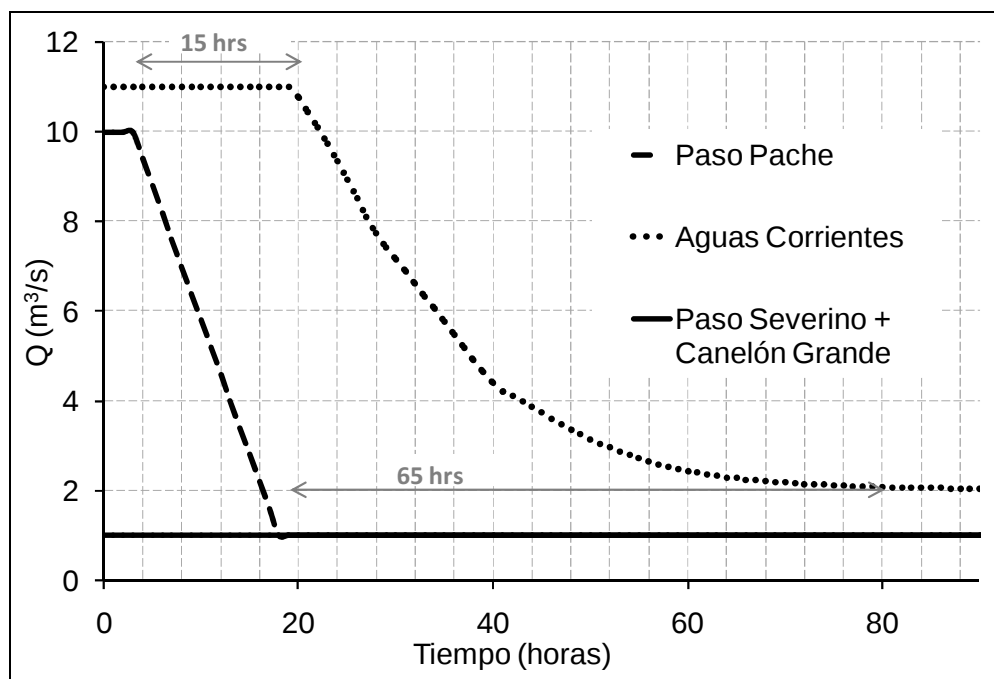


Figura 9.-Tránsito de una onda negativa entre Paso Severino y Aguas Corrientes.

A continuación se muestran ejemplos de utilización del modelo para el análisis de la gestión de la operación de la reserva de Paso Severino con el objetivo de asegurar un adecuado bombeo en la toma de la planta potabilizadora de Aguas Corrientes. Este análisis permite establecer la importancia de la modelación hidrodinámica del sistema fluvial Santa Lucía en cuanto al manejo del recurso hídrico, en particular de su principal uso: el abastecimiento de agua para Montevideo y su zona metropolitana.

El escenario considerado asume que el aporte del río Santa Lucía comienza siendo suficiente para abastecer a la planta de Aguas Corrientes, luego decrece y si no se opera Paso Severino el nivel en Aguas Corrientes también decrece como lo muestra la curva punteada del gráfico de la Figura 11. Con el objetivo de mantener el nivel constante levemente por debajo de la cota de vertido en Aguas Corrientes (nivel de alarma para la toma de agua), se empleó el modelo para, mediante un proceso iterativo, obtener las condiciones de erogación de caudal en Paso Severino que permiten cumplir el objetivo planteado. En la Figura 10 se presenta el escenario planteado (línea a trazos) y el resultado de la erogación necesaria por Paso Severino para poder cumplir la consigna del nivel en Aguas Corrientes por encima del nivel de precaución.

La Figura 11 presenta los resultados de la evolución del nivel de agua en Aguas Corrientes para la situación sin operación y con operación de las válvulas de Paso Severino.

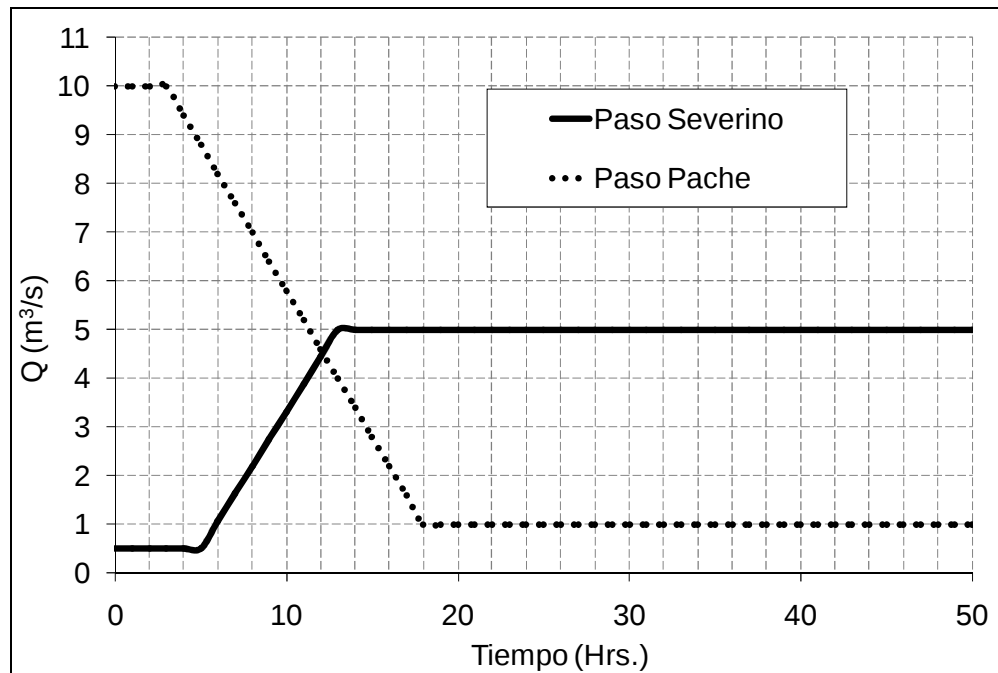


Figura 10.- Operación de Paso Severino para mantener un nivel constante en Aguas Corrientes cuando el caudal desciende en Paso Pache

En esta simulación se observa que operando las válvulas de forma de compensar la disminución de caudal del río Santa Lucía es posible mantener el nivel constante en Aguas Corrientes. Esta operación consiste en abrir las válvulas gradualmente 2 horas después que comenzó a decrecer el caudal en Paso Pache, pasadas 10 horas se mantiene la apertura de las válvulas de forma de erogar un caudal de $5 \text{ m}^3/\text{s}$.

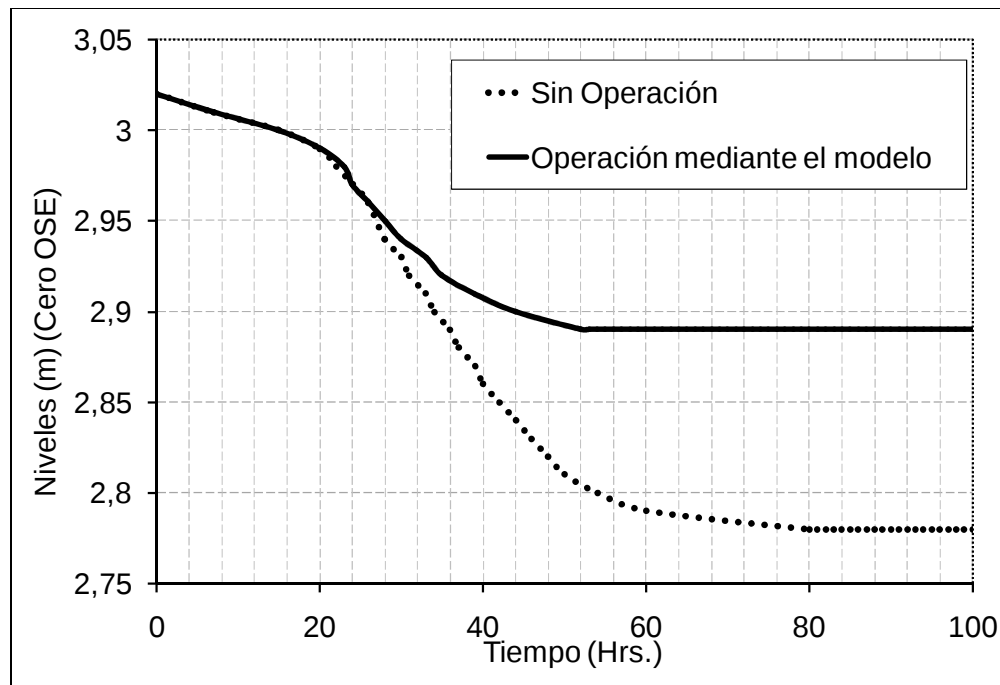


Figura 11.- Comparación entre los resultados de niveles en Aguas Corrientes de considerar o no la operación de Paso Severino presentada en la Figura 23.

Por otra parte, esta forma de operar el embalse de Paso Severino, que se resume en regular el caudal erogado, según los resultados del modelo, de forma de compensar la disminución o aumento del aporte del río Santa Lucía, permite evitar vertidos en Aguas Corrientes innecesarios. Estos vertidos se cuantificaron simulando las condiciones registradas en el período comprendido entre diciembre del 2008 y enero del 2009. Este fue un periodo de sequía crítica en el que los aportes del río Santa Lucía no fueron suficientes para cubrir la demanda de la planta, por lo que la demanda se cubrió exclusivamente de la gestión de la reserva de Paso Severino. Los resultados obtenidos en la simulación se muestran en la Figura 12.

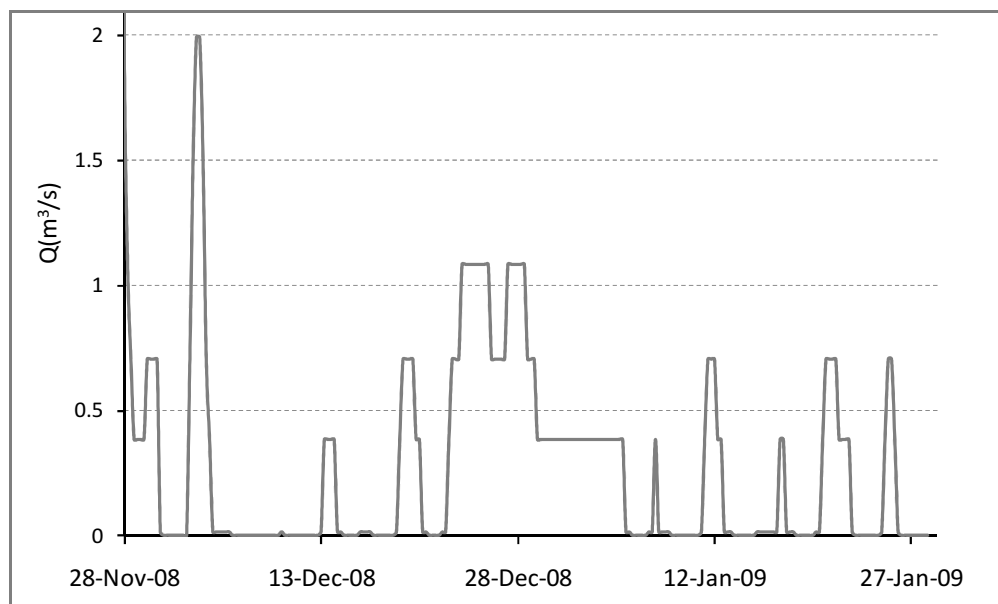


Figura 12.- Caudales vertidos aguas abajo de la planta de Aguas Corrientes en el período Noviembre 2008-Enero2009

El volumen total de agua vertida en el periodo de análisis alcanza a 1,64 Hm³, lo que equivale al consumo de 3 días de la zona metropolitana de Montevideo, cantidad evidentemente crítica en situación de sequía intensa. Ese volumen vertido pudo ser ahorrado en caso de contarse en su momento con el modelo que se presenta en este artículo. Puede afirmarse entonces que la herramienta desarrollada permite optimizar el uso de las reservas de agua bruta, minimizando el volumen desaprovechado por vertimientos innecesarios, gestionando adecuadamente el embalse de Paso Severino.

CONCLUSIONES

Se ha presentado el desarrollo de un modelo hidrodinámico unidimensional no estacionario como herramienta de gestión de los recursos hídricos de una cuenca de importancia para el abastecimiento de agua potable de la mayor parte de la población de Uruguay. En particular, se presentaron los resultados obtenidos en la modelación del sistema fluvial que abastece a Montevideo y la zona metropolitana.

El sistema fluvial modelado está conformado por el río Santa Lucía, el río Santa Lucía Chico y el arroyo Canelón Grande. Las condiciones de borde fueron establecidas en Paso Severino, Paso Pache y la represa de Canelón Grande (aguas arriba), y en Aguas Corrientes (aguas abajo). El modelo también considera la toma de la planta potabilizadora de Aguas Corrientes y el aporte de los afluentes, como hidrogramas de egreso o ingreso puntual en las secciones correspondientes.

El modelo fue implementado y ajustado sus parámetros con la información topo-batimétrica e hidrométrica disponible a la fecha. Se obtuvo un comportamiento estable del modelo para las distintas condiciones hidrodinámicas simuladas y una buena representación de los niveles medidos en Aguas Corrientes. Este modelo se ha traspasado y se encuentra en poder del organismo responsable del abastecimiento de agua potable en Uruguay.

El modelo resulta una herramienta de fácil implementación y utilización, que permite conocer con mayor detalle el tránsito del agua entre su erogación en las reservas y la toma en la planta potabilizadora. De esta forma es posible gestionar las reservas, erogando solamente los caudales necesarios y evitando su desaprovechamiento.

Se ha mostrado la robustez y potencialidad de la herramienta a partir de la modelación de distintos escenarios hidrológicos, llegando a generar algunas consignas primarias de operación de las reservas de agua bruta, en particular frente a periodos de sequía.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Brunner, G.W (2008). *HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual*. US Army Corps of Engineers.

Kirpich, Z.P.(1940). "Time of concentration of small agricultural watersheds". *Civil Engineering*. Vol 10, No 6, pp 362.

Wurbs, Ralph A. (1994) *Computer model for water resources planning and management* US Army Corps of Engineers.