ANÁLISIS DE LA APLICACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO "SMAP" EN LA CUENCA DEL RÍO SAN ANTONIO

LÓPEZ, EDUARDO G.[1]; ÁLVAREZ, JAVIER[2,3]; CUNHA COSTA, ALEXANDRE[4]; ALLENDE GARCÍA, M. CARLA[1]; GARCÍA CÉSAR L.[3] Y PEPINO MINETTI, ROBERTO C.[1].

1: Centro de Investigación y Transferencia en Ingeniería Química Ambiental (CIQA)
Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Córdoba (UTN – FRC)
Maestro M. López esq. Cruz Roja Argentina (X5016ZAA), Córdoba
e-mail: elopez@ciqa.com.ar

2: Centro de Estudios y Tecnología del Agua (CETA)
Universidad Nacional de Córdoba – Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (UNC – FCEFyN)
Dr. Juan Filloy s/n, Córdoba
e-mail: javierañvarez.ic@gmail.com

3: Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)
Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva de la Nación

4: Universidade da Integracao Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)
Ceará, Brasil
e-mail: cunhacos@unilab.edu.br

Resumen. *La cuenca del río San Antonio es una de las más importantes en la Provincia de Córdoba, ya que desempeña múltiples funciones: turismo, riego y provisión de agua para potabilizar a algunas ciudades importantes como Carlos Paz. A raíz de los vertiginosos crecimientos poblacionales registrados en esta región serrana, esta cuenca de clima semi-árido adquiere mucho valor en la gestión del recurso hídrico (GRH) provincial buscándose disminuir las incertidumbres relacionados a las proyecciones hídricas y mejorar la toma de decisiones minimizando los impactos en planos económicos y sociales. Para ello, es necesario calibrar y validar un modelo hidrológico que permita representar los procesos de la cuenca a una escala hidrológica compatible. El presente trabajo tiene por objetivo evaluar en dicha cuenca el modelo "SMAP", el cual es un modelo hidrológico continuo y agregado que ha demostrado buenos resultados en el Semiárido Brasilero y cuenta con una resolución temporal mensual, es libre, de código abierto y simple de implementar. Se modeló la cuenca en un período de 5 años y mediante el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NS) se observó la bondad de la simulación obteniendo buenos resultados de NS tanto para los periodos de calibración como de validación. Se concluye que es posible adaptar el modelo brasilero a la cuenca serrana mediante una parametrización previa generando caudales que sirven de guía para la GRH de la misma. Por último, los caudales resultantes de la simulación darán la base para futuros trabajos en proyección hidroclimática y predicción estacional en el marco del actual cambio climático.*

Palabras clave: Gestión del recurso hídrico, Modelo Hidrológico, SMAP, río San Antonio.

1. INTRODUCCIÓN

El manejo adecuado de los recursos implica protegerlos con el fin de garantizar su uso sustentable en el presente para conservarlos para las generaciones futuras. En el caso de los recursos hídricos, estos se vuelven primordiales pues son el sustento para la vida y las actividades humanas de mayor interés, es decir, consumo de agua potable, riego, generación eléctrica, turismo, etc.

La cuenca del río San Antonio es un importante recurso ya que es un factor fundamental en el desarrollo productivo, turístico y social de la región de Villa Carlos Paz y localidades aledañas. Este río es uno de los dos más importantes afluentes del lago San Roque con el que se aprovisiona de agua potable las ciudades de Villa Carlos Paz y Córdoba, con una población efectiva de más de 1.600.000 habitantes [1]. Es por ello, que el manejo integrado de esta cuenca adquiere valor significante en las políticas provinciales de Gestión del Recurso Hídrico (GRH).

La GRH busca orientar el desarrollo de políticas públicas en materia de recurso hídrico a través de una combinación de desarrollo económico, social y la protección del medioambiente. Es un proceso que promueve la gestión y aprovechamiento coordinado de los recursos hídricos con el fin de maximizar el bienestar social y económico de manera equitativa sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas [2].

Es por ello que se vuelve necesario conocer el comportamiento de la cuenca del río San Antonio para gestionar las actividades y dar respuesta a las demandas de dicha cuenca. Los fenómenos hidrológicos son extremadamente complejos, sin embargo, en ausencia de un conocimiento completo, se pueden representar en forma simplificada mediante un modelo hidrológico a escala de cuenca. Éste, en términos generales, busca representar los diferentes procesos involucrados en la distribución de la lluvia y la generación de caudales [3]. El conocimiento del caudal como salida del modelo permite tomar decisiones en la gestión del recurso, realizar proyecciones futuras tanto de esta subcuenca como de la cuenca del San Roque.

En este trabajo se presenta la aplicación del modelo SMAP en la cuenca del río San Antonio, el cual demuestra que alcanza buenos resultados en la simulación y es una herramienta que logra representar correctamente la cuenca siendo un cimiento óptimo para la toma de decisiones.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Caso de estudio. Cuenca Río San Antonio

La cuenca del río San Antonio se encuentra en el departamento de Punilla, en la Provincia de Córdoba, Argentina. Comprende dos subcuencas principales conocidas comunmente como cuenca alta y baja. Esta cuenca es una de las dos afluentes de mayor aporte del Embalse San Roque, el cual colecta también las aguas del segundo afluente, el río Cosquín.

La cuenca posee una superficie de 490 km^2 y se caracteriza por tener relieve fuerte con accidentes asociados a la tectónica (escarpes, cornisas, quebradas, etc.). Se encuadra dentro de los sistemas hidrológicos típicos pues posee fuertes pendientes, un punto de salida bien

definido, clara divisoria de aguas, baja permeabilidad y altos índices de escorrentía. La pendiente de la cuenca es de 2,5% lo que controla en buena medida la velocidad con que se da la escorrentía superficial y afecta, por lo tanto, el tiempo que tarda el agua de la lluvia para concentrarse en los cursos que constituyen la red de drenaje de la cuenca [3].
Las condiciones atmosféricas generan el dominio de un clima local semi-húmedo con tendencia al clima semi-seco de montaña, sin verano térmico, con invierno térmico sólo en la zona alta de la cuenca y sin déficit [6].
Las lluvias se concentran en verano. No sólo son suficientes para satisfacer las necesidades de agua sino que a veces las superan y llegan a ser excesivas. Las precipitaciones, por la influencia de las condiciones geomorfológicas, fluctúan entre 600 y 800 mm. anuales en la cuenca media y baja, con un incremento que va de 800 a más de 900 mm. anuales en la alta. Esto se debe a la mayor condensación de la humedad del aire que produce el efecto orográfico regido por las cumbres de la Sierra Grande. El promedio anual más elevado de precipitaciones se registra en el periodo octubre-marzo; mientras que entre los meses de abril-septiembre se registra la mayor frecuencia de sequías.
A partir de octubre suelen comenzar las lluvias intensas y de corta duración prolongándose hasta marzo; con frecuencia están ligadas a tormentas convectivas severas por influencia del efecto orográfico. En este período del año es mayor la frecuencia de crecientes repentinas.
Desde los 1400 m.s.n.m. hasta las máximas alturas, las condiciones climáticas adquieren características propias de alta montaña. El aire es seco y los vientos fuertes y constante con dirección predominante sur y norte, aunque la morfología a veces influye localmente en este sentido [6].

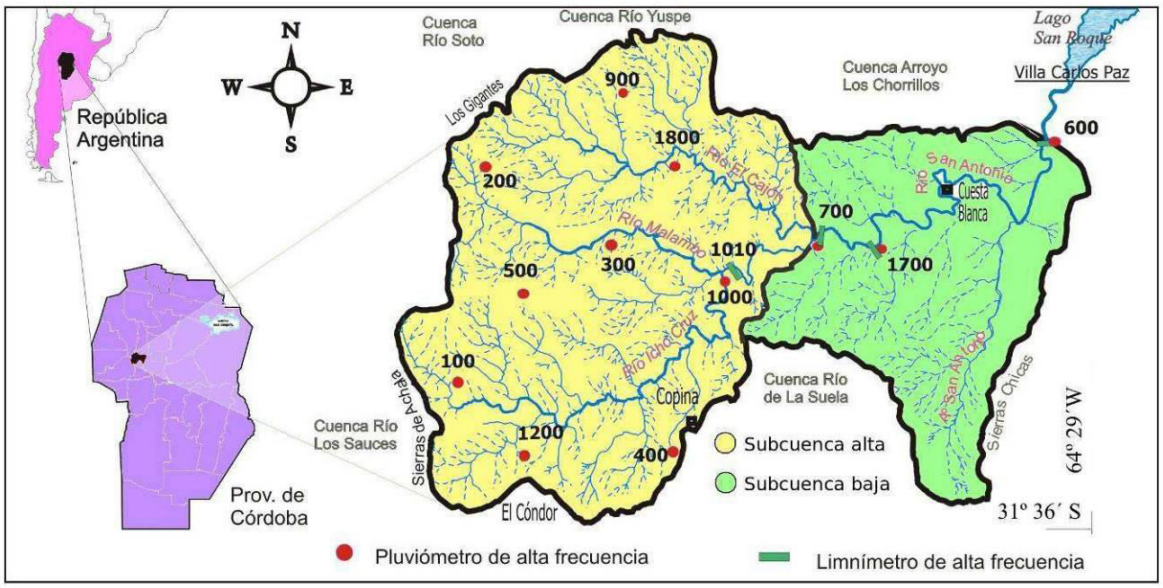

Fig. 2 – Ubicación geográfica de la cuenca San Antonio [3]

2.2. Metodología

2.2.1. Modelo SMAP

Soil Moisture Accounting Procedure (SMAP), es un modelo conceptual determinístico de simulación hidrológica continua que transforma la lluvia de entrada en caudal de salida mediante un balance de masa tipo hidrológico [4]. Es un modelo de difusión gratuita y código abierto muy sencillo a la hora de aplicarlo pues se define con un sistema de ecuaciones acotado de interpretación simple.

Al ser determinístico no considera términos aleatorios dentro del modelo, es decir, cada simulación que se realice produce el mismo resultado partiendo de los mismos datos de entrada.

Fue desarrollado en 1981 por João Eduardo G. Lopes [5] como resultado de la experiencia recabada con la aplicación del modelo Stanford Watershed IV y el modelo Mero por parte del Departamento de Agua y Energía Eléctrica del Estado de Sao Pablo, Brasil [4]. En primera instancia fue formulado para intervalos de tiempo diario y posteriormente se presentaron versiones horarias y mensuales adoptando algunas modificaciones en su estructura.

La capacidad del modelo es de:

- 320 horas y 6 estaciones de lluvia con registros por hora.
- 320 días y 6 estaciones de lluvia con registros por día.
- 9 años y 9 estaciones de lluvia mensuales.

El modelo SMAP en su versión mensual, se compone de dos reservorios que matemáticamente sus variables de estado se actualizan todos los meses de la siguiente forma:

$$Rsolo\ (i+1) = Rsolo\ (i) + P - Es - Er - Rec \quad (1)$$

$$Rsub\ (i+1) = Rsub\ (i) + Rec - Eb \quad (2)$$

Dónde:
Rsolo: reservorio suelo
P: precipitación (lluvia)
Es: escorrentía superficial
Er: evapotranspiración actual
Rec: recarga subterránea (percolación)
Rsub: reservorio acuífero subterráneo
Eb: escurrimiento básico (también conocido como flujo de retorno)

La Fig. 1 ilustra el diagrama de flujos de la estructura propia del modelo el cual está compuesto de cuatro funciones de transferencia:

$$Es = [(Rsolo / Str) \wedge PES] \cdot P \quad (3)$$

$$Er = (Rsolo / Str) \cdot Ep \quad (4)$$

$$Rec = CREC \cdot Rsolo \cdot [(Rsolo / Str) \wedge 4] \quad (5)$$

$$Eb = (1 - Kk) \cdot Rsub \quad (6)$$

Dónde:

$$Kk = (0,5) \wedge (1/Kkt) \quad (7)$$

Siendo:
Ep: evapotranspiración potencial
Str: capacidad máxima de almacenamiento del suelo (mm)
Pes: parámetro proporcional a la escorrentía superficial (adim.)
Crec: coeficiente de recarga (adim.)
Kk: constate de recesión (mes^{-1})

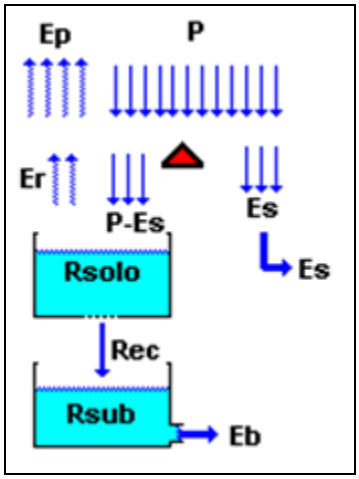

Fig. 1 – Estructura del modelo SMAP

Como se puede observar del sistema de ecuaciones, los parámetros del modelo son: Str, Pes, Crec y Kkt. Por otro lado, los datos de entrada son la precipitación mensual (como la suma total de eventos de lluvia) y la evapotranspiración potencial media mensual multianual. Finalmente, el cálculo del caudal total en el punto de descarga (outlet) de la cuenca resulta de:

$$Q=(Es+Eb)*Ad/2630 \quad (8)$$

Es decir, la sumatoria de la escorrentía superficial y el aporte subterráneo en volumen por unidad de tiempo, siendo "Ad" el área de la cuenca.

2.2.2. Calibración

La calibración del modelo se puede llevar a cabo de manera manual mediante "prueba y error". Esto requiere mucha experiencia del hidrólogo y constituye un proceso trabajoso y subjetivo. Por otro lado, presenta la ventaja del monitoreo total del hidrólogo en la determinación de cada parámetro, donde su experiencia se transfiere al proceso.
Sin embargo, se han utilizado métodos de optimización matemática para la calibración automática con el fin de reducir los tiempos y subjetividad del proceso. Desafortunadamente esto conduce a la falta de control paso a paso por parte del hidrólogo, lo que impide conocer la sensibilidad y, además, disminuye la fiabilidad de los resultados.

En el presente trabajo, se busca aprovechar las ventajas de ambos métodos con el fin de perseguir una calibración en tiempo reducido pero controlando el significado físico de los parámetros obtenidos.
Para la calibración se requiere 2-9 años de datos de caudal medio mensual de acuerdo a lo que recomienda la bibliografía [4].
A partir de la aplicación del modelo en cuencas de varias regiones brasileras, se presenta la oscilación esperada de los parámetros del modelo dentro de los siguientes intervalos:

$$400 < Str < 5000$$
$$0{,}1 < Pes < 10$$
$$0 < Crec < 20$$

Los estudios demuestran que la constante de regresión no presenta sensibilidad a distintas funciones objetivos por lo que debe ser ajustada de manera manual [4] posteriormente de realizar un ajuste razonable de los tres parámetros anteriores. Se presenta en la siguiente tabla la relación entre la constante de recesión con el tiempo (en meses) en que el flujo de retorno cae a la mitad de su valor (sin considerar recarga subterránea en ese período).

Kkt = 1 mes - muy rápido (.5000)
2 meses - rápido (.7071)
3 meses - medio (.7937)
4 meses - lento (.8409)
6 meses - muy lento (.8909)

2.2.3. Criterios de evaluación

El modelo SMAP es un modelo hidrológico continuo y agregado que ha demostrado buenos resultados en el Semiárido Brasilero. Debido a que el clima que caracteriza la cuenca del San Antonio es semiárido, se aplica dicho modelo para proyectar caudales de salida a futuro.
Como datos de entrada se utiliza la precipitación acumulada total registrada en 12 estaciones meteorológicas pertenecientes a CIRSA las cuales se encuentran distribuidas en la cuenca como muestra la Fig. 2. El valor ingresado para cada mes resulta de aplicar el método de polígonos de Thiessen. Por otro lado, la evapotranspiración potencial se calcula a partir de la temperatura sensada en el río por 9 estaciones y promediadas mediante el cálculo de Hargreaves. Se dispone de series cortas desde enero de 1994 a diciembre de 1997 y desde enero de 2002 a diciembre de 2006.
El modelo se corre y se analiza la bondad de la simulación mediante el coeficiente de eficiencia Nash-Sutcliffe el cual es uno de los más usados en hidrología. Se define como:

$$N.S. = 1 - [\Sigma (Q_{sim,i} - Q_i) \wedge 2] / [\Sigma (Q_i - Q_{arit}) \wedge 2] \quad (9)$$

En donde Q_{sim} es el caudal simulado en el período "i" y Q_i es el caudal observado para el mismo período. Q_{arit} es el caudal observado medio aritmétrico para el período de calibración o validación según corresponda. El coeficiente mide la relación de la variabilidad de las simulaciones respecto al de las observaciones. Si la simulación es ideal, N.S.=1. En la siguiente tabla se resumen valores sugeridos para la toma de decisiones:

N.S.	Ajuste
< 0,2	Insuficiente
0,2 – 0,4	Satisfactorio
0,4 – 0,6	Bueno
0,6 – 0,8	Muy bueno
> 0,8	Excelente

Tabla 1. Valores referenciales del criterio de Nash-Sutcliffe [7]

El método de calibración y validación se realizó partiendo de un valor inicial de los parámetros dentro de los intervalos expuestos en el apartado 2.2.2. y, mediante la herramienta Solver de Microsoft Excel, se maximizó las celdas objetivos correspondientes a los N.S. de calibración y validación respectivamente. Los valores obtenidos resultan de la iteración del ordenador a través de los algoritmos matemáticos.
Una vez determinados los parámetros del modelo mediante la calibración y validación, se evalúan los resultados utilizando el coeficiente de correlación. Se toma $0,50<R^2<0,75$ como relación media, $0,75<R^2<0,90$ como fuerte y $R^2>0.90$ como muy fuerte.

3. ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se procede a realizar la calibración del sistema a partir de los datos disponibles. Un análisis preliminar de las lluvias y caudales permitió observar que en la serie correspondiente al período 1994-1997, los meses de máximas lluvias no corresponden con los meses de caudales más intensos. Por ello, se trabajó sólo sobre la serie entre 2002 y 2006.
Para la calibración se hace correr la herramienta Solver que busca maximizar el valor de NS variando los parámetros Str, Pes, Crec y Kkt. El período de calibración fue desde marzo de 2002 a febrero de 2004. Luego se realizó la validación de los parámetros de igual manera con los datos correspondientes a marzo de 2004 a agosto de 2006.
En la siguiente tabla se pueden apreciar los resultados obtenidos:

Variable	Resultado
Crec	0
Pes	1,38
Str	2263,28
Kkt	1,20
N.S. calibración	***0,84***
N.S. validación	***0,60***

Tabla 2. Parametrización del modelo SMAP original

Los resultados muestran que los parámetros obtenidos ajustan de manera correcta con el período de calibración mientras que el N.S. de la validación muestra una simulación sólo buena. Lo llamativo es el parámetro de Crec nulo. Físicamente indica que no hay recarga subterránea en la cuenca.
Debido a la importancia de utilizar un modelo con la fuerte suposición de la inexistencia de un reservorio subterráneo, se modificó el modelo anulando el escurrimiento básico (Eb). De esta manera, el caudal simulado es resultado sólo de la escorrentía superficial y la recarga

subterránea (Rec) aporta al reservorio subterráneo (Rsub) sin generar flujos que retornen al cauce principal por lo que Rsub crece indefinidamente para cerrar el balance de masa. Con estas suposiciones se obtienen los resultados que se muestran a continuación:

Variable	Resultado
CREC	0,39
PES	1,24
STR	2200,01
KKT	1,20
N.S. calibración	***0,84***
N.S. validación	***0,59***

Tabla 3. Parametrización del modelo SMAP sin escurrimiento básico (Eb)

Se verifica que Kkt es poco sensible a los demás parámetros por lo que se mantiene sin modificación. Se logran valores de NS similares al caso anterior pero con un significado hidrológico más representativo. Sin embargo, si se desea mejorar el período de validación, el modelo vuelve a tender a un Crec nulo.
Finalmente, se evaluó el exponente de la ecuación 5 que define a la recarga subterránea ya que se encuentra fijo en el modelo. El parámetro se migró al exponente dejando Crec=1 para anular su impacto en el cálculo. La fórmula queda entonces como:

$$Rec = Rsolo \cdot [(Rsolo / Str) \wedge Crec2] \quad (10)$$

Corriendo el modelo nuevamente se obtienen los siguientes resultados:

Variable	Resultado
Crec	1 (*)
Pes	1,43
Str	2199,99
Kkt	1,48
Crec2	7,18
N.S. calibración	***0,82***
N.S. validación	***0,60***
(*) *Crec=1 fijado con el fin de evaluar únicamente los efectos de Crec2.*	

Tabla 4. Parametrización del modelo SMAP incorporando Crec2

A pesar de las modificaciones introducidas, el modelo resuelve N.S. similares de 0,8 y 0,6 para los períodos de calibración y validación respectivamente. En todos los casos, se observa que los parámetros ajustan tendiendo a anular la recarga subterránea.
De acuerdo a los resultados, las tres propuestas para el modelo tienen la misma bondad de simulación. Sin embargo, el grupo de trabajo concluye que el más representativo de la realidad es aquel sin escurrimiento básico. Siguiendo éste, se presentan en la Fig. 3 los caudales simulados obtenidos versus la serie corta de caudales medidos. Si bien, a nivel general la simulación ha logrado ser positiva, se puede observar que los máximos no son representados por el modelo.

En la Fig. 4, se muestra que existen correlación fuerte (R^2 ~ 0,85) entre los caudales obtenidos como salida del modelo frente a los de aforo de la cuenca correspondientes al período de calibración y una correlación media (R^2 ~ 0,58) para la validación.

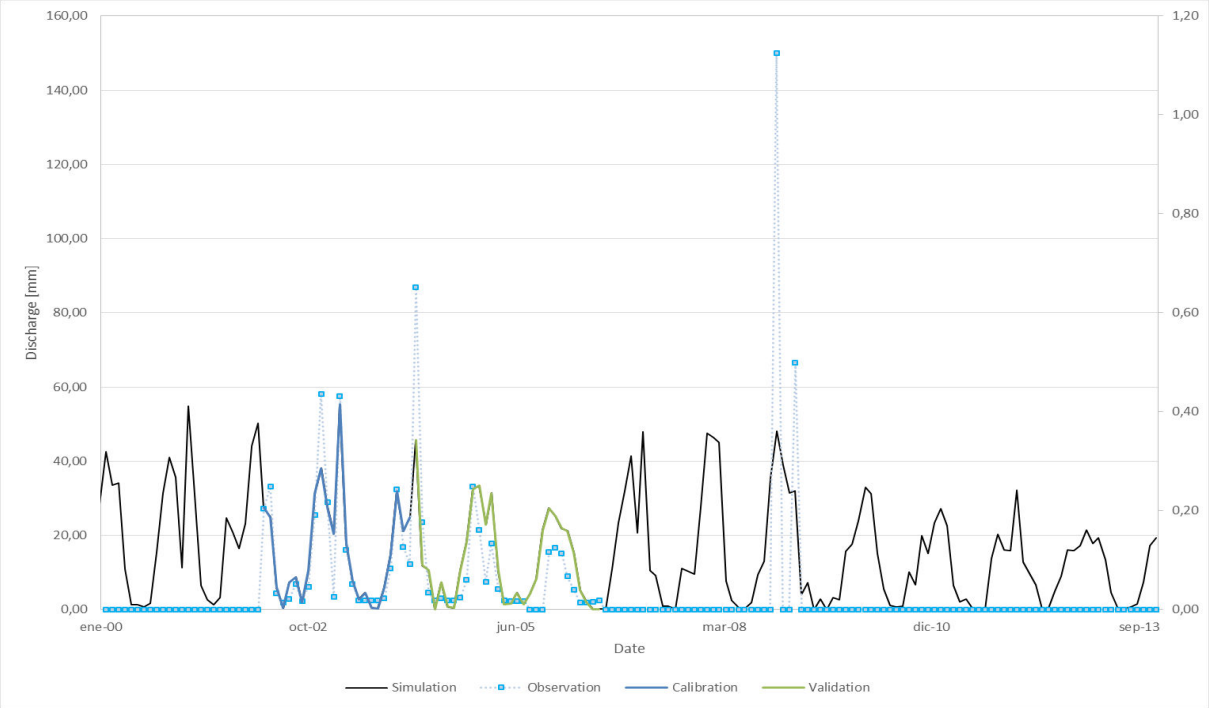

Fig 3. Serie de caudales observados y simulados.

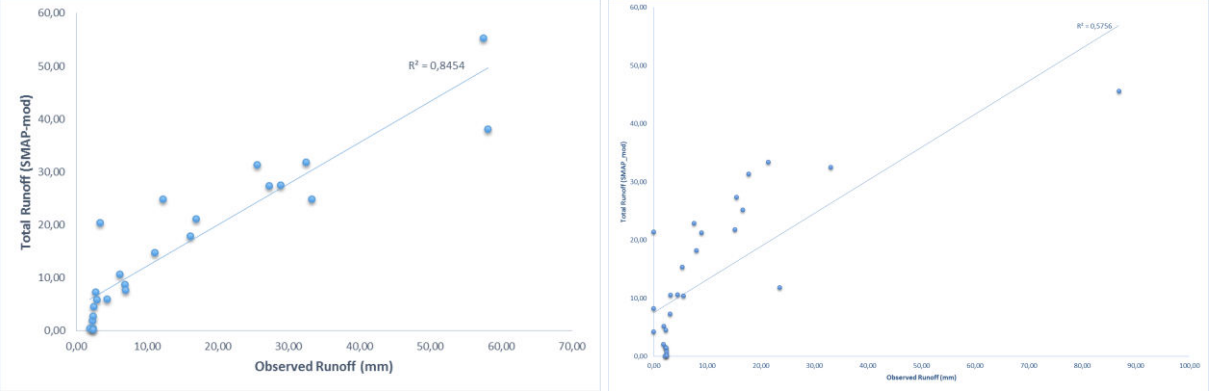

Fig 4. Serie de caudales observados y simulados.

4. CONCLUSIONES

- El modelo SMAP puede ser utilizado en la cuenca del río San Antonio para representar el comportamiento de la misma. Si bien se realiza una parametrización previa, el modelo brasilero es compatible con dicha cuenca.
- Se observa que en la actualidad, la accesibilidad de los datos hidrológicos es acotada por lo que se cuenta con series de datos cortas. Ello interfiere en la calibración y validación de los modelos hidrológicos ya que los parámetros no pueden ser extensibles a períodos muy alejados de los correspondientes a la calibración.
- Se hizo correr SMAP en su formato original y con dos modificaciones. Se observó para los tres escenarios planteados que el modelo es suficientemente robusto como para identificar el comportamiento de la cuenca y minimizar el escurrimiento básico debido que la cuenca evaluada posee fuertes pendientes, baja permeabilidad y altos índices de escorrentía. Es por ello que el reservorio subterráneo va a tener aportes muy bajos al cauce del río en sí mismo.
- Los valores obtenidos de N.S. demuestran que el modelo puede ser utilizado como una herramienta primaria para toma de decisiones. Sin embargo, debe ser tratado con cautela para casos donde se demanda información detallada ya que el modelo no representa los máximos (crecidas).

REFERENCIAS

[1] ADARSA, Asociación de Amigos del Río San Antonio, información extraída en el día de la fecha (Mayo, 2017) de la página web: *http://www.adarsa.org.ar*

[2] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de la República de Colombia, *Política Nacional de Gestión Integral del Recurso Hídrico*, Convenio 423, Bogotá (2016).

[3] Weber J., Jorquera E. y Dasso C., *Estimación de parámetros y análisis de incertidumbre de un modelo hidrológico continúo para dos cuencas de la región serrana de Córdoba*, XXIII Congreso Nacional del Agua, Resistencia, Chaco, Argentina (2011).

[4] Lopes J., User Guide, *SMAP-Manual*, (1999).

[5] Lopes J., Braga B. y Conejo J., "SMAP - A Simplified Hydrological Model", Applied Modelling in Catchment Hydrology, *Water Resourses Publications*, Editorial V. P. Singh, (1982).

[6] Ugarte R., Barbeito O., Ambrosino S., Felicci G., *Mitigación de la amenaza por inundaciones repentinas em las comunas del sur de Punilla, Provincia de Córdoba*, INA CRSA, (2006).

[7] Molnar, P., "Calibration", *Watershed Modelling*, Institute of Environmental Engineering, Chair of Hydrology and Water Resources Management, ETH Zurich, Switzerland, (2011).