

CALIBRACIÓN DE SIMULACIONES DE CRECIDAS DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO SAUCE GRANDE, PROVINCIA DE BUENOS AIRES, ARGENTINA.

RUNOFF CALIBRATION ON THE SAUCE GRANDE RIVER BUENOS AIRES PROVINCE, ARGENTINA

Sandra Noemí Fernández^{(1)(2)(*)}, Daniel Enrique Pérez⁽¹⁾, Carlos Fernando Weis⁽¹⁾ y Miguel Ángel Flores.⁽¹⁾

⁽¹⁾ Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur (UNS), Bahía Blanca, Argentina

⁽²⁾ Comisión de Investigaciones Científicas, La Plata, Argentina.

^(*)e_mail: sfernand@uns.edu.ar

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo es calibrar una herramienta de simulación hidrológica para aplicar a la cuenca alta del Río Sauce Grande (CASG), Provincia de Buenos Aires, Argentina, la cual reviste una importancia central en el Sudoeste Bonaerense. Se utilizan datos de precipitaciones y caudales medidos en campo, con los cuales se alimentó el HEC-HMS v.4.2.1. Se usó el método de número de curva del Soil Conservation Service. El tránsito de avenidas fue resuelto por el método de Muskingum. Se lograron ajustes entre muy buenos y excelentes según el índice de Nash-Sutcliffe. La herramienta hidrológica calibrada utilizada simula satisfactoriamente eventos de tormentas reales. La cuenca muestra un alto grado de sensibilidad al estado inicial de humedad, por lo que es recomendable definir al menos dos escenarios relacionados con los intervalos entre precipitaciones para simulaciones con tormentas de proyecto. Se presentan valores promedio y desvío estándar de los parámetros de ajuste para cada subcuenca.

Palabras clave: río Sauce Grande; escorrentía superficial; simulación de crecidas; HEC-HMS.

ABSTRACT

The objective of the present work is to calibrate a hydrological simulation tool to be used on the Sauce Grande River High Basin (CASG), Buenos Aires Province, Argentina, which is of crucial importance for the Bonaerense southwest. Rain fall and flow rate field data are used to feed the HEC-HMS 4.2.1. Soil Conservation Service Curve number method is implemented. Muskingum method is used to solve the flood routing. Very good to excellent fit is obtained according to the Nash-Sutcliffe efficiency index. The calibrated hydrological tool turns up to simulate satisfactorily real storm events on the basin. Great variability is observed associated to the initial humidity, so at least two initial states related to intervals between storms should be defined to simulate project storms. Adjustment parameters averages and standard deviations are presented for each sub-basin.

Keywords: Sauce Grande River; Runoff; Flood simulation; HEC-HMS.

INTRODUCCIÓN

El conocimiento de los procesos hidrológicos es fundamental ya que es precisamente en las cuencas hidrográficas donde se genera el agua para diferentes usos del suelo y consumo humano. Por tanto, el desarrollo y puesta a punto de herramientas que permitan simular el rendimiento hídrico se revela como estratégico para el manejo del agua.

El río Sauce Grande recorre desde su nacimiento en el Sistema de Ventania una longitud total de 170 km hasta su desembocadura en el océano Atlántico (Figura 1). Su cuenca total es la más importante del sudoeste bonaerense con un área total de 4609 km² (Gil, 2009).

La Cuenca Alta del Río Sauce Grande (CASG), a los fines del presente trabajo, se define desde las nacientes del Sauce Grande en el Sistema de Ventania hasta la Ex-toma de agua de Aguas Corrientes de Obras Sanitarias donde se encuentra la Estación Limnigráfica L2; 6 km aguas arriba del Embalse Paso de las Piedras (Figuras 1 y 2). Posee una superficie de 861 km² y en ella el cauce principal recorre 66 km.

El río transita una zona de producción agrícola ganadera (Aduriz et al., 2003) y presenta una creciente actividad turística. Además, es el aporte primario al Embalse del Dique Paso de las Piedras. Este embalse, de 328 hm³ de volumen máximo (Schefer, 2004) y construido a comienzos de la década de 1970, constituye en la actualidad la principal fuente de abastecimiento de agua potable para las ciudades de Bahía Blanca, Punta Alta y de agua cruda al polo industrial cercano, lo cual pone de relieve la importancia estratégica del mismo. (Fernández et al., 2019)

La zona de estudio del río Sauce Grande (CASG) se encuentra ubicada en el contexto geológico de las Sierras Australes, presentando tres unidades geomorfológicas importantes: las serranías, los niveles de piedemonte con cobertura loésica y el valle del río (Rabassa, 1982). La primera incluye las sierras de la Ventana y de Las Tunas con pendientes pronunciadas en la zona de divisoria de aguas. En esa zona se observan cárcavas de carácter torrencial que dan lugar a la formación de la mayoría de los afluentes, algunos permanentes y otros temporarios, que discurren en pequeños y profundos cañadones sobre las pendientes más pronunciadas. Posteriormente, se presenta la zona del piedemonte,

que alcanza áreas de menores pendientes. Por último, la unidad geomorfológica correspondiente a la llanura aluvial del río, compuesta principalmente por material sedimentario moderno con un espesor variable y pendientes más moderadas. Se destaca la presencia de barrancas cuyas paredes verticales y alturas variables entre 3 y 8 m encajonan y controlan el cauce del río (Luque et al., 1979).

El clima es templado, con una temperatura media en el mes de julio de 7 °C y de 23,5 °C en enero; las precipitaciones anuales en la zona de estudio oscilan entre 650 y 950 mm (Vouilloud et al., 2005). Las lluvias no son regulares a lo largo del año, sino que se concentran principalmente durante primavera y otoño. Esto hace que el río presente variaciones muy importantes en el nivel de agua y en la velocidad de la corriente hasta su llegada al dique, a partir del cual el caudal del río depende de los niveles de erogación del embalse (López Cazorla et al., 2003).

Según Gil (2009), la información de caudales es dispersa y se concentra en los últimos años, de manera tal que no permite realizar un estudio hidrológico detallado, como es el caso de estimación de los períodos de retorno de caudales que generan desbordes en los ríos. La mayor tormenta registrada hasta la actualidad fue la del 7 de abril de 1944 que produjo desbordes e inundación en varios sectores de las localidades de Sierra de la Ventana y Saldungaray con pérdidas de vidas humanas y económicas. Casi 60 años después (6 al 9 de octubre de 2003) se produjo otra crecida, afectando nuevamente a las poblaciones localizadas en la cuenca. En este caso el caudal del río aumentó de forma imprevista llegando a superar los ocho metros sobre el cauce y se produjeron desbordes en algunos sectores de Sierra de la Ventana. Hubo 180 evacuados, sin víctimas mortales.

En la CASG, se suelen producir incendios forestales de considerable magnitud, especialmente en la zona de las nacientes y piedemonte de la cuenca. El principal problema, al momento de combatir el fuego sin control, es el acceso al agua. Una posible acción para mejorar esta situación, sería la construcción de una serie de pequeñas presas distribuidas en la zona que provean espejos de agua accesibles en caso de siniestros. Para encarar una solución de este tipo es fundamental contar con una herramienta hidrológica que permita simular caudales a partir de lluvias y poder de esta manera establecer un plan de acción basado en datos certeros.

La actividad turística en la comarca serrana ha venido en aumento consistentemente por más de 20 años (Aduriz et al., 2003), lo que conlleva a un incremento en la demanda de agua para distintos usos (consumo, piscinas, riego, etc.). Además, se verifica un crecimiento de la población estable en la zona. Por ejemplo, Sierra de la Ventana, Villa Ventana y Saldungaray acusaron un aumento poblacional de 43 %, 37 % y 5 % respectivamente según datos censados por el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INDEC, 2001; INDEC, 2010). Similares valores se ven en otros centros turísticos de la zona, lo que implica una sobrecarga a los sistemas de servicio preexistentes, entre ellos, agua potable.

Fernández et al. (2019) presentan una calibración hidrológica con HEC-HMS 4.2.1 en el sector superior de la Cuenca Alta del Río Sauce Grande. La superficie de aporte total es de 177.042 km², la longitud del curso principal de agua más largo medido desde la naciente es de 20.26 km, la pendiente media es de 2.7%, la altitud máxima es cercana a 900 metros sobre el nivel del mar (msnm) y la mínima de 300 msnm. Se reportaron cinco eventos de tormenta observados en la zona durante el año 2015 con sus correspondientes hidrogramas medidos en la Estación Limnigráfica L1 y registros de precipitación de una única Estación Meteorológica con pluviógrafo. Los valores de bondad de ajuste del estadístico de eficiencia de Nash-Sutcliffe muestran ajustes de muy buenos a excelentes, demostrando que el modelo representa adecuadamente la respuesta de la cuenca ante eventos reales. Se procedió a extraer el flujo base del hidrograma observado por medio del método de la pendiente variable. Las pérdidas por infiltración y abstracciones de lluvia se calculan mediante el método del Número de Curva del Soil Conservation Service. Se implementa el método de Muskingum de traslado de onda de crecida. Este trabajo resulta el primero de su clase para la zona estudiada.

Fernández et al. (2021) presentan una validación de dos tormentas en base a cinco calibradas. En este trabajo se seleccionan siete tormentas registradas por tres pluviógrafos de la zona y sus correspondientes hidrogramas, medidos en la estación limnigráfica L1. Si bien el área de estudio coincide con la considerada en la publicación de Fernández et al. (2019), la validación contó con una base de datos pluviográficos provenientes de tres estaciones meteorológicas en lugar de una, cuya información fue procesada mediante el método de

los polígonos de Thiessen. Se cambia, además, la metodología de extracción del escurrimiento base a partir de un algoritmo estocástico de un parámetro en lugar del método gráfico de la pendiente variable. Los coeficientes Nash-Sutcliffe obtenidos indican muy buenos a excelentes valores de calidad del ajuste, tanto para tormentas calibradas como validadas.

Por su parte, Espósito (2014) aplica el modelo HEC-HMS, en su versión 3.3, a la cuenca del arroyo El Divisorio de 400 km² que en su desembocadura aporta el 20% del agua al embalse Paso de las Piedras, aguas debajo de la estación limnigráfica L2. El modelo reproduce satisfactoriamente el comportamiento hidrológico, por ende, resulta una herramienta útil para la estimación de caudales y volúmenes de escorrentías ante la ocurrencia de distintos eventos en esta cuenca.



Figura 1: Ubicación del área del estudio (CASG).

OBJETIVOS

Se plantea como objetivo de este trabajo, calibrar una herramienta de simulación hidrológica, que se pueda aplicar a lluvias de proyecto, manejo del recurso hídrico, apoyo a obras civiles en el área (pequeñas presas para consumo de agua y/o recreación, reservas para atacar incendios de verano, defensas, controles de crecida, alcantarillas, etc.), simulación de calidad de agua, transporte de

sedimentos, escenarios de cambio climático, etc.

METODOLOGÍA

Zona de estudio (CASG)

La cuenca a estudiar abarca desde las nacientes del Sauce Grande hasta la estación limnigráfica L2 (Ex-toma de agua de Aguas Corrientes de Obras Sanitarias) y está integrada por 16 subcuencas asociadas a afluentes de Sauce Grande y 9 subcuencas que drenan directamente al curso principal (Figura 2). Los afluentes que aportan son los arroyos del Abra, El Atravesado, Mambaches, de las Piedras, Abra Fea, El Negro, El Toro y Las Mercedes sobre su margen izquierda, y arroyos Destierro Primero, de los Remansos, Horqueta del Sauce, del Oro, Rivero, San Bernardo, San Teófilo y Rivera sobre su margen derecha (Figura 2).

Delimitación de la cuenca

La cuenca estudiada se delimitó mediante la digitalización de las cartas topográficas del Instituto Geográfico Nacional, Escala 1:50.000, correspondientes a Sierra de la Ventana, Saldungaray y Peralta con equidistancias de 25 m; Estancia Gran Chaco, De las Águilas, Sierra de Las Tunas y Tornquist con equidistancia 10 m y Stegmann con equidistancia 5 m. En base a éstas, se realizó un modelo de terreno utilizando la herramienta AutoCAD versión 2010. Se complementó la información con imágenes satelitales provenientes de Google Earth. La georeferenciación de las estaciones meteorológicas y limnigráficas se realizó mediante un GPS Garmin 276C (con altimetría).

Monitoreo hidrometeorológico

Se contó con datos de 2 pluviómetros de las respectivas estaciones meteorológicas instaladas en la zona. Los mismos miden 0.3 mm de columna de agua por cada caída de las cubetas basculantes. Los datos de precipitación se registraron cada quince minutos. Se cuenta además con los datos de dos estaciones limnigráficas (L1 y L2) que proporcionan mediciones de nivel de agua superficial cada hora. En las mismas el equipo de medición consta de una sonda de acero inoxidable con sensor de presión piezoresistivo (marca GENICA). El conjunto es alimentado por una batería de 12V y todas las

conexiones y dispositivos eléctricos se encuentran alojadas en un abrigo anti vandálico, fabricado en el taller del Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Nacional del Sur. En la Tabla 1 se presentan las coordenadas y elevaciones respecto del nivel del mar de las estaciones meteorológicas y limnigráficas utilizadas en este trabajo. Las Figuras 3, 4, 5 y 6 ilustran las estaciones meteorológicas y limnigráficas mencionadas.

Precipitaciones

Las precipitaciones caídas en cada subcuenca se determinaron como promedios ponderados del área de influencia de cada pluviógrafo, la cual fue determinada de la siguiente manera: se une la posición de las estaciones meteorológicas entre sí, trazando luego la mediatriz del segmento de unión. Las intersecciones de esta mediatriz con los límites de la cuenca determinan el área de influencia de cada pluviómetro sobre las distintas subcuencas (Figura 7).

Hidrograma y flujo base

Se cuenta con la curva de altura caudal o curva h-Q en dos secciones de control emplazadas sobre el cauce principal del río Sauce Grande correspondientes a las Estaciones Limnigráficas L1 y L2. Las mediciones de niveles de las aguas superficiales se registran cada hora y se transforman en caudal observado a través de las relaciones h-Q.

Éstas fueron determinadas y calibradas mediante relevamientos -con estación total- de secciones transversales y perfiles longitudinales con elevaciones y progresivas, aplicación del método área-pendiente y la realización de varios aforos con molinete y uso de un correntómetro ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) en distintos estados del río. Las ecuaciones h-Q siguen leyes potenciales y se actualizan periódicamente con nuevos aforos. Con esta herramienta, se producen series de tiempo de caudal en función del tirante de agua.

Las Figuras 8 y 9 muestran las secciones transversales correspondientes a las Estaciones Limnigráficas L1 y L2 con la indicación de los niveles de la superficie libre del agua para los caudales máximos modelados, 7.67 m³/s y 16.92 m³/s respectivamente, junto a fotografías de cada lugar.

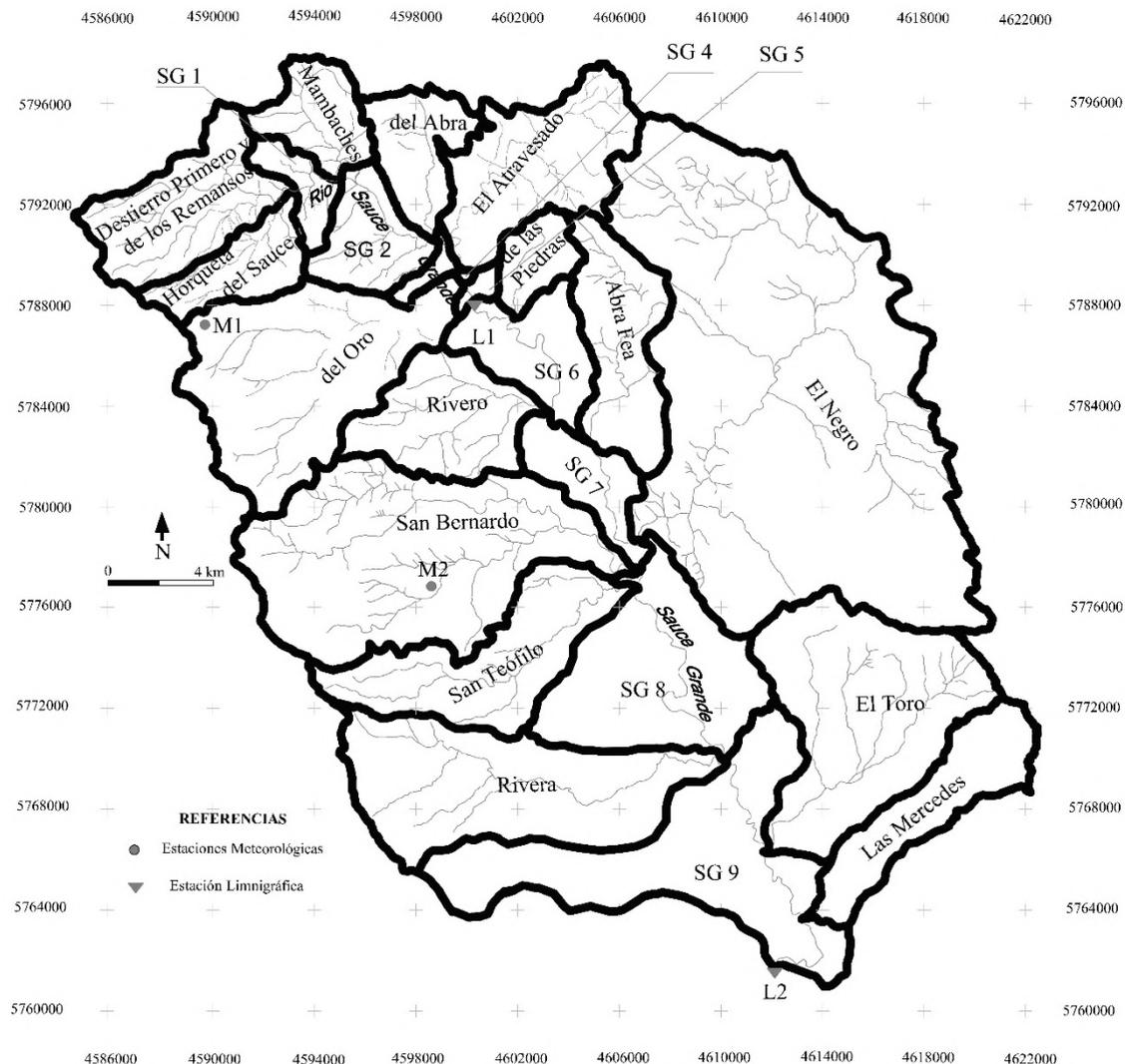


Figura 2: Cuenca de estudio, estaciones de medición y delimitación de subcuencas.

Tabla 1. Latitud, Longitud, coordenadas planas y elevación de las estaciones utilizadas. Fuente: elaborado por Fernández y Pérez sobre la base de relevamiento en campo.

Tipo de Estación	Coordenadas Gauss-Kruger (Zona 4-Campo Inchauspe)		Coordenadas Geográficas		Elevación (m.s.n.m.)
	X	Y	Latitud (Sur)	Longitud (Oeste)	
	(m)	(m)	(-)	(-)	
Limnigráfica L1	4600254.236	5788024.364	38° 03' 15.81"	61° 51' 30.77"	300
Limnigráfica L2	4612127.67	5761772.63	38° 17' 30.24"	61° 43' 05.00"	177
Meteorológica M1	4589627.462	5787918.08	38° 03' 23.26"	61° 58' 46.53"	580
Meteorológica M2	4598289.238	5776104.149	38° 09' 43.11"	61° 52' 45.46"	370



Figuras 3, 4, 5 y 6: de izquierda a derecha Estación limnigráfica L2, Estación meteorológica M1, Estación meteorológica M2 y estación Limnigráfica L1. Fuente: Fotografías tomadas por Fernández.

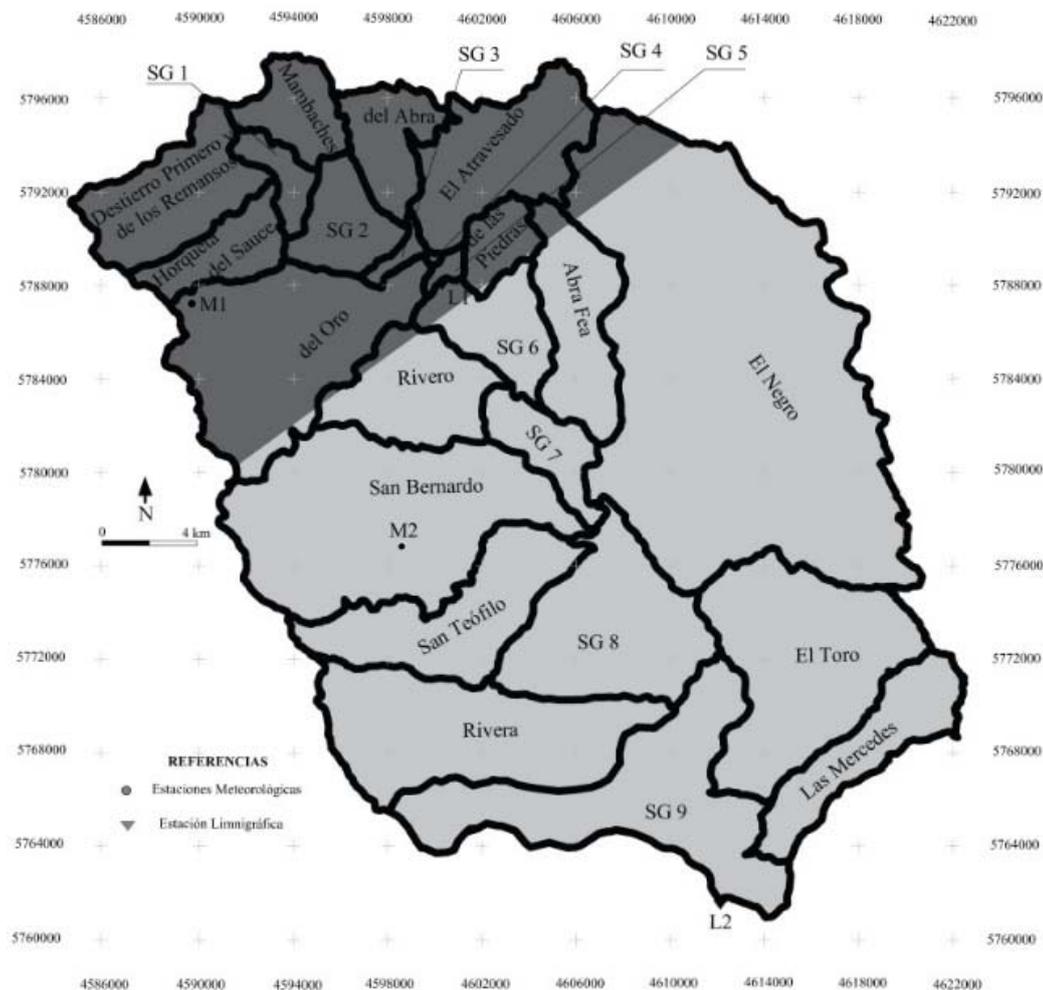


Figura 7: Área de influencia de los pluviógrafos de las estaciones M1 y M2 para las subcuencas de la CASG. Fuente: elaborado por Fernández y Pérez sobre la base de cartas topográficas del Instituto Geográfico Nacional

Estas tareas se llevaron a cabo en el marco de los proyectos de investigación “Cuencas del sur de la región pampeana-predictibilidad climática, hidrología, calidad y modelización de los recursos hídricos. Fase II” y “Cuencas del sur de la región pampeana. Hidrología, calidad y modelización de los recursos hídricos. Fase III”, dirigidos por los docentes Ing. Mario Sequeira y Dra. Ing. Sandra Fernández del Departamento de Ingeniería de la UNS, y financiadas por la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la UNS.

La simulación requiere la escorrentía superficial, la cual se obtiene de restar el flujo base, del observado, obteniéndose así el Hidrograma de Flujo Superficial Observado (HFSO). Se determinó el flujo base por medio de un algoritmo estocástico, o filtro numérico, aplicado a las series de datos de caudales asociadas a los registros de las Estaciones Limnigráficas.

El algoritmo numérico adoptado es el de un parámetro Ecuación (1) (Gómez-Isidroy Gómez-Ríos, 2016).

$$Q_{b(i)} = \frac{K}{2-K} Q_{b(i-1)} + \frac{1-K}{2-K} Q_{(i)} \quad (1)$$

Donde $Q_{b(i)}$ es el caudal base en cada tiempo i , K es el factor de agotamiento de la curva, $Q_{(i)}$ es el caudal observado en cada instante i . El factor de agotamiento de la curva se obtiene por medio de la Ecuación 2.

$$Q_t = Q_0 e^{-kt} \quad (2)$$

Donde k (horas^{-1}), la constante de recesión, la cual se obtiene por medio de una regresión lineal de los valores logarítmicos del caudal en el tiempo, a partir de que se inicia la recesión. El algoritmo numérico requiere de un solo parámetro: K que responde a la

Ecuación (3) y representa las condiciones físicas de la cuenca y propiedades del hidrograma (Gómez-Isidroy Gómez-Ríos, 2016).

$$K = e^{-k} \quad (3)$$

Datos de los eventos usados para la calibración

En la Tabla 2 se muestran las fechas de 7 eventos de tormenta observados en el año 2015. Se presentan los valores de precipitación acumulada en mm para cada pluviógrafo de las dos estaciones meteorológicas y el caudal en el pico en m^3/s del hidrograma observado obtenido de la curva de $h-Q$ en cada estación limnigráfica.

Las Figuras 10 a 23 detallan los hietogramas e hidrogramas totales observados que se produjeron en las correspondientes fechas.

Aplicación del Modelo hidrológico HEC-HMS

Se usó el programa HEC-HMS, en su versión 4.2.1, creado por el Hydrologic Engineering Center del U. S. Army Corps of Engineers. Este software permite simular la transformación de lluvia histórica o hipotética en escorrentía mediante un sistema que integra diferentes métodos hidrológicos y se basa en estructurar la cuenca origen en subcuencas asociadas a los cauces de la red fluvial (Figura 24).

Se adoptó el método de Muskingum para el tránsito de avenidas en la cuenca, el cual exige fijar dos parámetros, K y X , en cada tramo para considerar el efecto de almacenamiento del cauce en la crecida. En el caso de los tramos ubicados en el sector superior de la CASG, se propusieron como valores iniciales aproximados los obtenidos en Fernández et al. (2019).

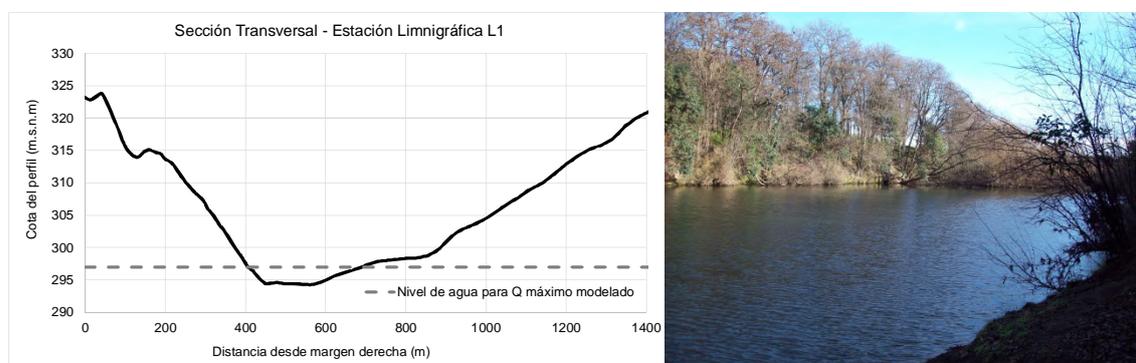


Figura 8: De izquierda a derecha, sección transversal del cauce en la Estación Limnigráfica L1 con indicación del nivel de la superficie libre del agua para el caudal máximo modelado ($7.67 \text{ m}^3/\text{s}$) y Paisaje del lugar. Fuente: Fotografía tomada por Fernández.

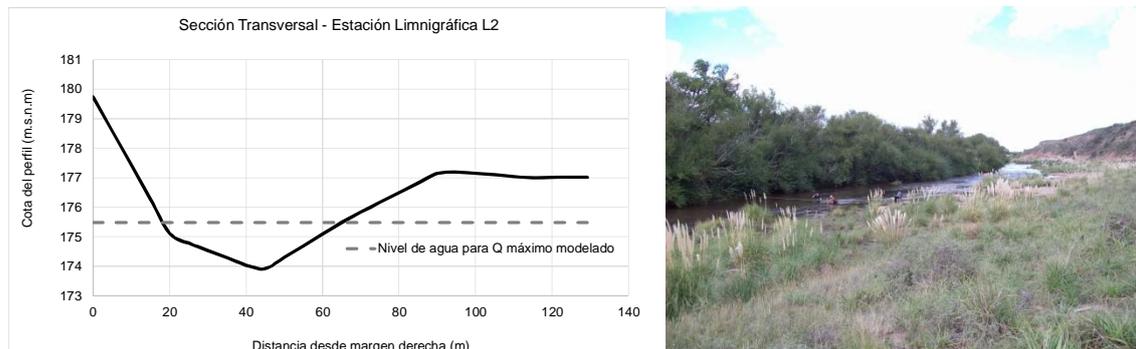
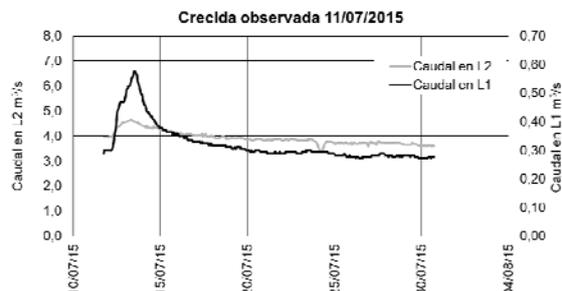
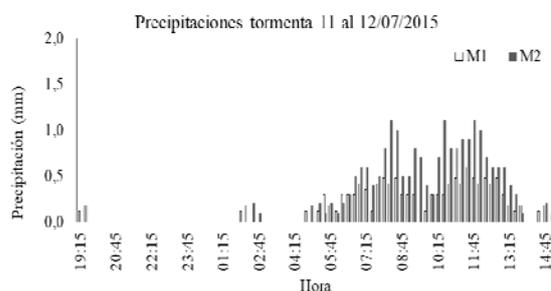


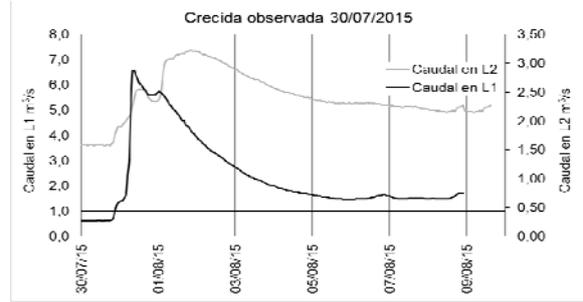
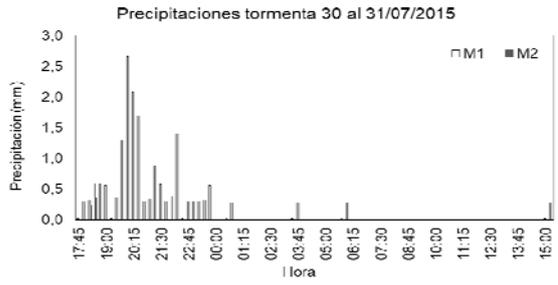
Figura 9: De izquierda a derecha, sección transversal del cauce en la Estación Limnigráfica L2 con indicación del nivel de la superficie libre del agua para el caudal máximo modelado ($16.92 \text{ m}^3/\text{s}$) y Paisajedel lugar. Fuente: Fotografía tomada por Fernández.

Tabla 2. Eventos de tormenta observados: fecha, precipitación acumulada y caudal en el pico del hidrograma total observado. Fuente: elaborado por Fernández sobre la base de los datos de las estaciones hidrometeorológicas.

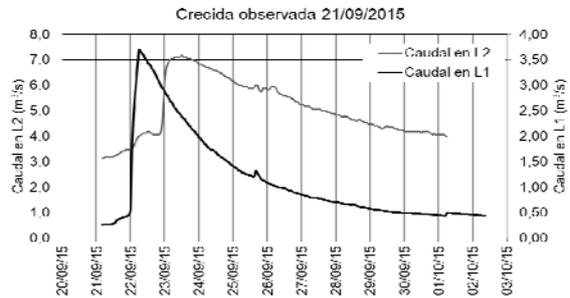
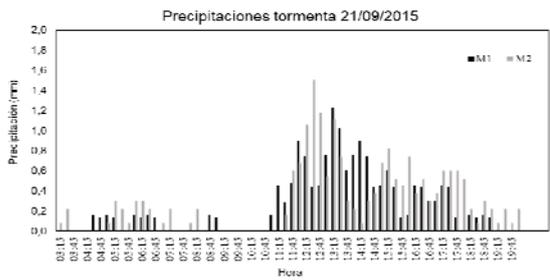
Fecha del Evento	Precipitación acumulada M1 (mm)	Precipitación acumulada M2 (mm)	Caudal en elpico Hidrograma Observado L1 (m^3/s)	Fecha del pico Hidrograma observado L1 (m^3/s)	Caudal en el pico Hidrograma observado L2 (m^3/s)	Fecha del pico Hidrograma observado L2 (m^3/s)
11/07/15	12.6	21	0.58	13/07/2015 14:00	4.64	13/07/2015 08:00
30/07/15	17.7	29.4	2.87	31/07/2015 08:00	7.38	01/08/2015 20:00
21/09/15	16.8	19.8	3.69	22/09/2015 06:00	7.17	23/09/2015 12:00
01/10/15	21.9	40.8	6.85	02/10/2015 10:00	16.45	03/10/2015 00:00
14/10/15	24.6	33	7.67	15/10/2015 15:00	16.92	16/10/2015 03:00
19/10/15	13.8	10.5	5.65	20/10/2015 14:00	10.93	21/10/2015 05:00
16/12/15	31.5	46.5	5.65	17/12/2015 07:00	11.69	17/12/2015 20:00



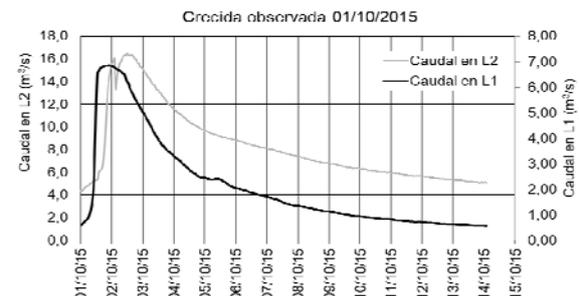
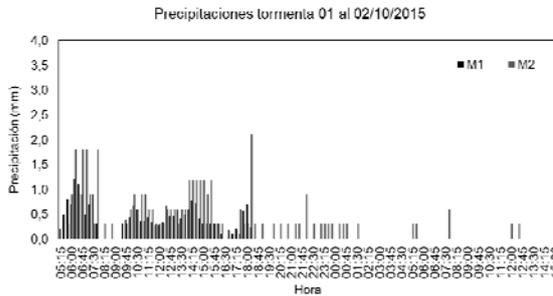
Figuras10 y 11:De izquierda a derecha,precipitaciones observadas en las estaciones meteorológicas M1 y M2 y Crecidas registradas en las estaciones limnigráficas L1 y L2 para el 11/07/2015.



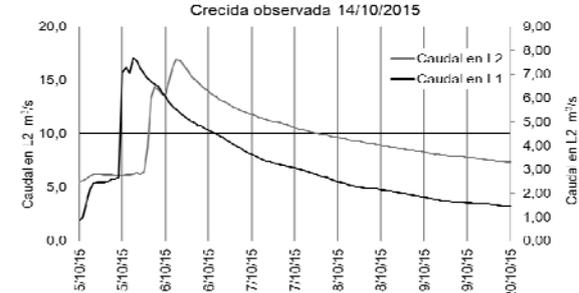
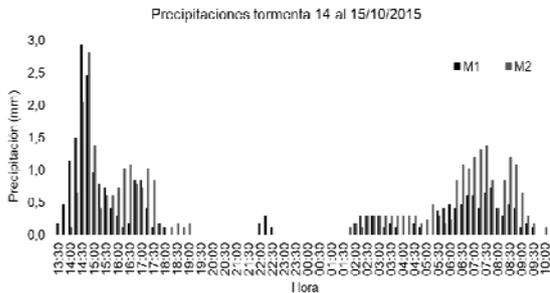
Figuras 12 y 13: De izquierda a derecha, precipitaciones observadas en las estaciones meteorológicas M1 y M2 y Crecidas registradas en las estaciones limnigráficas L1 y L2 para el 30/07/2015.



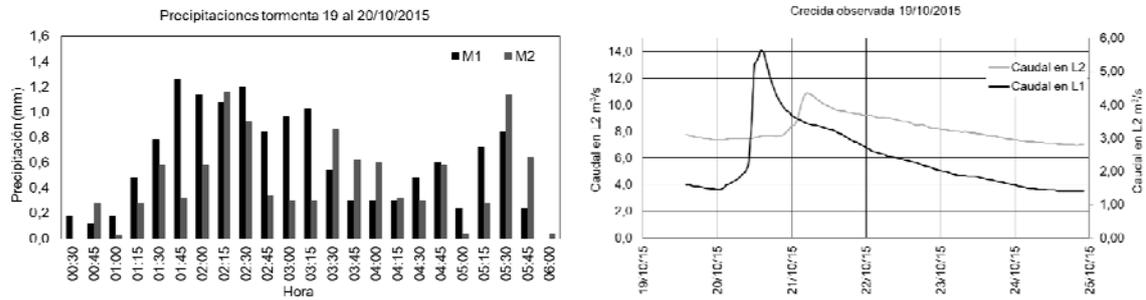
Figuras 14 y 15: De izquierda a derecha, precipitaciones observadas en las estaciones meteorológicas M1 y M2 y Crecidas registradas en las estaciones limnigráficas L1 y L2 para el 21/09/2015.



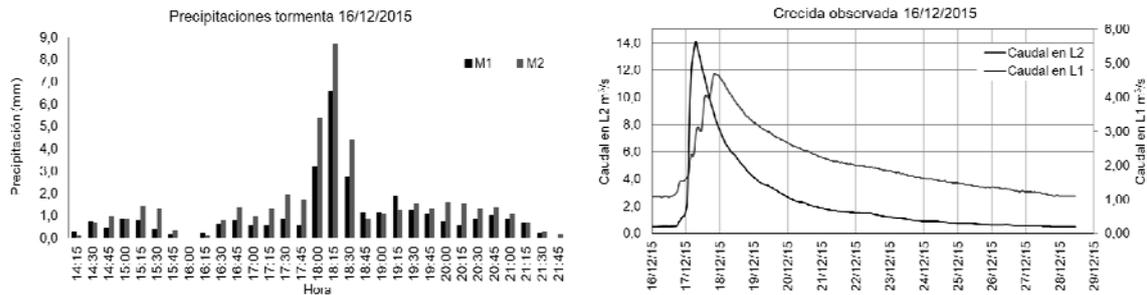
Figuras 16 y 17: De izquierda a derecha, precipitaciones observadas en las estaciones meteorológicas M1 y M2 y Crecidas registradas en las estaciones limnigráficas L1 y L2 para el 01/10/2015.



Figuras 18 y 19: De izquierda a derecha, precipitaciones observadas en las estaciones meteorológicas M1 y M2 y Crecidas registrados en las estaciones limnigráficas L1 y L2 para el 14/10/2015.



Figuras 20 y 21: De izquierda a derecha, precipitaciones observadas en las estaciones meteorológicas M1 y M2 y Crecidas registradas en las estaciones limnigráficas L1 y L2 para el 19/10/2015.



Figuras 22 y 23: De izquierda a derecha, precipitaciones observadas en las estaciones meteorológicas M1 y M2 y Crecidas registradas en las estaciones limnigráficas L1 y L2 para el 16/12/2015.

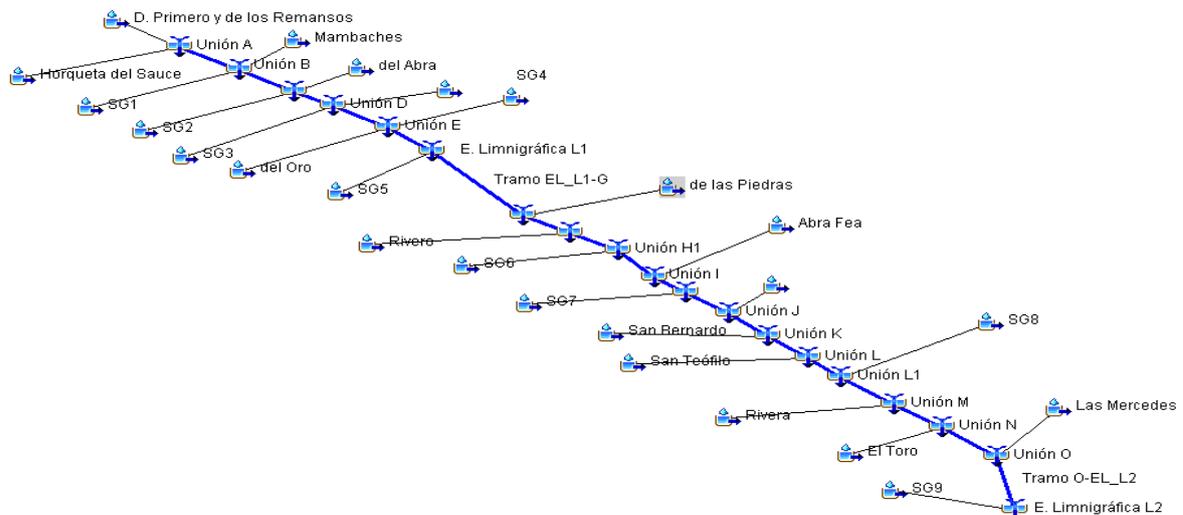


Figura 24: Modelo de la cuenca de estudio estructurado por el programa HEC-HMS. Fuente: elaborado por Fernández y Pérez sobre la base del programa HEC-HMS.

Para los valores iniciales de K y X a aplicar en la restante área de la CASG, se estimaron en función de las características hidráulicas en los tramos adyacentes a las estaciones limnigráficas L1 y L2 (Cunge, 1969) a través de las Ecuaciones (4) y (5).

$$K = \frac{\Delta x}{c} \quad (4)$$

$$X = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{Q}{B S_0 c \Delta x} \right) \quad (5)$$

Donde Δx es la longitud del cauce considerado, C es la celeridad de la onda (estimada en 5/3 velocidad media) (USACE, 1994), S_0 es la pendiente media del cauce, Q es el caudal y B es el ancho superficial del canal.

Una vez estimados los valores iniciales se procedió a aplicar la optimización de los mismos por ensayo y error. El programa HEC-HMS permite establecer una función objetivo la cual calcula nuevos valores que ajustan mejor los hidrogramas observados. El método de ajuste de la función objetivo se llevó a cabo aplicando el mínimo de la suma de residuales cuadrados (Hydrologic Engineering Center, 2016). Esta operación se realiza las veces necesarias para lograr el mejor ajuste posible, en todas las tormentas. Los valores de K y X ajustados para la cuenca figuran en la Tabla 3.

Asimismo, los valores de los tiempos de concentración fueron adoptados en base a Kirpich (Chow et al., 1994), y sus valores permanecieron constantes en todas las tormentas, así como los de K y X de Muskingum.

Tabla N° 3. Valores de K y X del método Muskingum para evaluación de la avenida de las crecidas en la cuenca alta del Sauce Grande, optimizados en base al método de la suma de los residuales cuadrados.

Tramos	K (horas)	X
Tramo A-B	24	0.1
Tramo B-C	13	0.1
Tramo C-D	10.5	0.1
Tramo D-E	13	0.1
Tramo E-E. Limnigráfica L1	12	0.1
Tramo E. Limnigráfica L1-G	25	0.1
Tramo G-H	22	0.1
Tramo H-H1	12	0.1
Tramo H1-I	12	0.1
Tramo I-I1	28	0.1
Tramo I1-J	18	0.1
Tramo J-K	29	0.1
Tramo K-L	20	0.1
Tramo L-L1	0.5	0.1
Tramo L1-M	3.4	0.1
Tramo M-N	6.5	0.1
Tramo N-O	12	0.1
Tramo O-E. Limnigráfica L2	10.13	0.1

La calibración se llevó a cabo a partir de los siguientes parámetros de ajuste:

- CN (Número de Curva del Soil Conservation Service del United States Department of Agriculture (U.S.D.A.) que contempla el tipo de suelo de la cuenca y su humedad inicial y permite calcular la precipitación efectiva de una tormenta y el

escurrimiento superficial (Hydrologic Engineering Center, 2000; Hydrologic Engineering Center, 2016).

- Abstracción inicial. Evalúa la capacidad de la cuenca de retener y percolar la precipitación. El agua escurre solo una vez que la lluvia alcanza el valor de la Abstracción Inicial.
- Almacenamiento máximo e inicial. Toma en cuenta la retención de agua por el efecto de árboles, arbustos, pastos y cultivos. Una vez colmada esta capacidad de retención, el agua comienza a caer al suelo. Este volumen es evaporado en su totalidad si las condiciones meteorológicas lo permiten.

Medidas de bondad de ajuste

La cuantificación de la bondad de ajuste del modelo se efectuó por medio del índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe mostrado en la Ecuación (6) (Nash y Sutcliffe, 1970).

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{SIM} - Q_i^{OBS})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{OBS} - \bar{Q}^{OBS})^2} \quad (6)$$

En donde Q_i indica el caudal, n es el número de datos simulados, los superíndices SIM y OBS indican valores simulados y observados respectivamente y la barra superior indica el valor medio en el período de estudio. Este indicador mide cuanto de la variabilidad de las observaciones es explicada por la simulación y produce resultados menores o iguales a 1. Si el resultado es 1 el ajuste es perfecto, si es cero el error es del mismo orden de magnitud que la varianza de los datos observados por lo que la media de los datos observados tendrá una capacidad predictora similar al modelo. En este trabajo se adopta la propuesta de Molnar (2011) para clasificar los valores de E, de acuerdo con la Tabla 4.

Tabla 4. Valores referenciales de Criterio de Nash-Sutcliffe.

Eficiencia Nash-Sutcliffe	Ajuste
< 0.2	Insuficiente
0.2-0.4	Satisfactorio
0.4-0.6	Bueno
0.6-0.8	Muy bueno
> 0.8	Excelente

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se determinaron las pendientes del decaimiento de los hidrogramas de las tormentas usadas, según las Ecuaciones 2 y 3 presentadas anteriormente. Los

valores del factor de agotamiento K y la constante de recesión k para ambas estaciones limnigráficas L1 y L2, se muestran en la Tabla 5.

En la Tabla 6 se presentan los valores de Volumen de escorrentía, Hora del pico y caudal en el pico para cada tormenta en cada estación limnigráfica tanto para valores simulados como observados. Se incluyen los coeficientes de eficiencia de ajuste de Nash-Sutcliffe en cada caso.

Los valores presentados en la Tabla 6, indican que el promedio de los errores calculados como la diferencia entre valor observado menos el valor simulado dividido el valor observado en porcentaje, para el caudal en el pico y Volumen de escorrentías de 10% y 13% respectivamente, para la estación limnigráfica L1, mientras que para la L2 los valores son de 9% y 1% respectivamente. El horario donde se produce el pico simulado varía entre los 312 minutos de atraso y 595 minutos de adelanto para la estación L1, y 660 de adelanto y 360 de atraso para la estación L2. Se puede observar que los valores del coeficiente de eficiencia de ajuste de Nash-Sutcliffe son siempre mayores a 0.72, lo cual indica ajustes entre muy buenos y excelentes (Tabla 4).

La Tabla 7 indica los valores promedio y desvío estándar de los parámetros de ajuste hallados: CN, Abstracción inicial, almacenamiento Inicial y Máximo Almacenamiento de las distintas

Subcuencas de las tormentas simuladas, que produjeron los ajustes anteriormente mostrados en Figuras 10 a 23.

Los resultados de las simulaciones realizadas sobre las tormentas en base a los parámetros antes descriptos se muestran en las Figuras 25 a 38.

El esquema de monitoreo de las tormentas producidas en la CASG que consistió en dos estaciones pluviométricas (M1 y M2) y dos estaciones limnigráficas apropiadamente aforadas permitió simular satisfactoriamente el comportamiento hidrológico de la cuenca. HEC-HMS representó exitosamente siete tormentas reales sobre la cuenca alta del Río Sauce Grande. Los coeficientes de eficiencia de ajuste de Nash-Sutcliffe corresponden a ajustes muy buenos a excelentes. Por primera vez, se presenta una herramienta hidrológica calibrada para la estratégica zona de estudio.

La diferencia entre los volúmenes de escorrentía observados y simulados es menor al 13% (Tabla 6). Por lo tanto los volúmenes de escorrentía simulados son una muy buena estimación del volumen que efectivamente ingresa al Embalse Paso de las Piedras, y de esta manera el HEC-HMS, adecuadamente calibrado, se convierte en una herramienta útil para la gestión del recurso hídrico, en especial para el citado embalse que recibe prácticamente la totalidad de la escorrentía de la zona de estudio.

Tabla 5. Valores de la constante de recesión y el factor de agotamientos obtenidos de los hidrogramas asociados a las tormentas usadas para calibración en las dos estaciones limnigráficas L1 y L2.

Fecha de la tormenta	Estación Limnigráfica L1		Estación Limnigráfica L2	
	Constante de recesión (hora ⁻¹)	Factor de agotamiento	Constante de recesión (hora ⁻¹)	Factor de agotamiento
11/07/2015	0.0086	0.98	0.0149	0.966
30/07/2015	0.0251	0.975	0.035	0.922
21/09/2015	0.0318	0.969	0.003	0.997
01/10/2015	0.008	0.992	0.010	0.990
14/10/2015	0.0955	0.909	0.154	0.857
19/10/2015	0.0124	0.972	0.146	0.710
16/12/2015	0.0007	1.002	0.00001	1.000

Tabla 6. Valores simulados y observados de hora de pico, caudal del pico y volumen de escorrentía para las tormentas utilizadas en la calibración en las estaciones L1 y L2, con el correspondiente coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe.

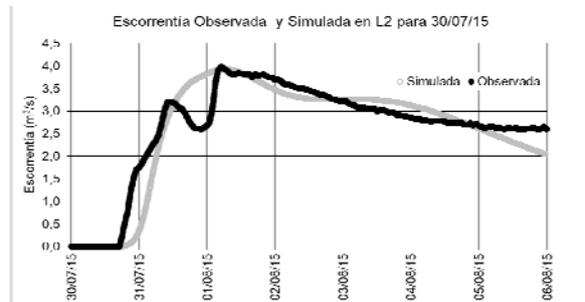
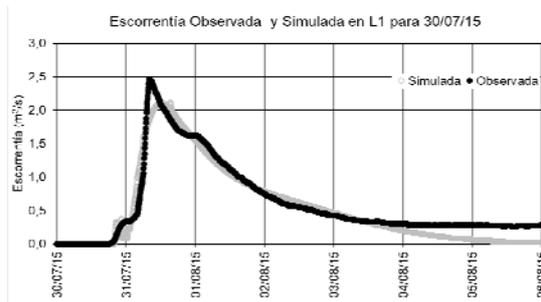
Tormentas seleccionadas	Estación Limnigráfica L1						Eficiencia Nash-Sutcliffe
	Valores Escorrentía Superficial Observados			Valores Escorrentía Superficial Simulados			
	Hora del pico	Caudal en el pico (m ³ /s)	Volumen escorrentía (*1000 m ³)	Hora del pico	Caudal en el pico (m ³ /s)	Volumen escorrentía (*1000 m ³)	
11/07/2015	13/07/2015 12:00	0.29	60.05	13/07/2015 02:05	0.26	47.91	0.875
30/07/2015	31/07/2015 08:00	2.47	364.43	31/07/2015 15:20	2.11	329.17	0.926
21/09/2015	22/09/2015 06:00	3.09	526.5	22/09/2015 04:55	3.18	445.97	0.775
01/10/2015	02/10/2015 03:00	6.16	1204.7	02/10/2015 05:22	6.44	1106.66	0.950
14/10/2015	15/10/2015 12:00	5.53	708.73	15/10/2015 17:15	4.52	633.17	0.823
19/10/2015	20/10/2015 14:00	4.33	501.43	20/10/2015 14:20	3.60	438.01	0.731
16/12/2015	17/12/2015 07:00	5.48	520.25	17/12/2015 06:00	4.38	459.5	0.906
Estación Limnigráfica L2							
11/07/2015	13/07/2015 08:00	0.69	150.52	13/07/2015 08:20	0.67	169.29	0.743
30/07/2015	01/08/2015 05:00	3.98	1618.87	01/08/2015 08:55	3.93	1574.82	0.785
21/09/2015	23/09/2015 12:00	4.28	1902.56	23/09/2015 06:00	4.24	1920.02	0.766
01/10/2015	02/10/2015 14:00	12.05	4521.74	03/10/2015 01:06	11.5	4425.14	0.938
14/10/2015	16/10/2015 03:00	9.67	2103.03	16/10/2015 02:55	8.08	2025.60	0.875
19/10/2015	21/10/2015 05:00	6.36	1631.47	21/10/2015 12:05	5.19	1537.57	0.734
16/12/2015	17/12/2015 20:00	9.04	2725.49	17/12/2015 16:50	7.33	2478.29	0.895

Tabla 7. Valores promedio de CN, Abstracción inicial, Almacenamiento Inicial y Máximo Almacenamiento promedio de las distintas subcuencas. Fuente: elaborado por Fernández y Pérez sobre la base de los resultados del programa HEC-HMS.

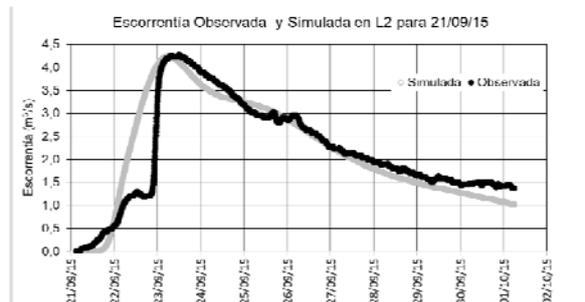
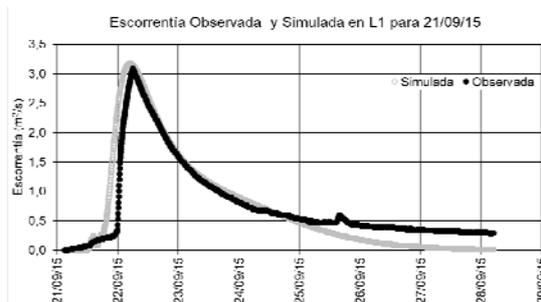
Subcuenca	Promedio				Desvío Estándar			
	Abstracción inicial (mm)	CN	Almacenamiento inicial (%)	Máximo almacenamiento (mm)	Abstracción inicial (mm)	CN	Almacenamiento inicial (%)	Máximo almacenamiento (mm)
Destierro Primero y de los Remansos	1.8	71.6	1.1	2.3	0.6	17.2	0.4	2.3
Horqueta del Sauce	1.6	73.4	1.1	2.1	0.5	16.6	0.4	2.1
Mambaches	1.8	67.7	1.1	2.1	0.6	13.6	0.4	2.1
del Abra	1.8	67.5	1.3	2.3	0.8	17.1	0.5	2.3
El Atravesado	2.1	65.7	1.1	2.7	0.8	18.8	0.4	2.7
del Oro	2.1	69.7	1.1	2.0	0.9	14.8	0.4	2.0
de las Piedras	1.2	73.6	1.4	2.6	0.6	22.5	0.8	2.6
Abra Fea	1.4	65.9	1.4	3.4	0.5	21.3	0.8	3.4
Rivero	1.7	60.8	1.3	3.2	0.8	25.2	0.8	3.2
San Bernardo	1.6	59.5	1.4	2.8	0.4	22.0	0.8	2.8
El Negro	1.6	59.5	1.4	3.6	0.7	22.8	0.8	3.6
San Teófilo	2.0	56.5	1.6	3.1	0.6	23.1	0.8	3.1
Rivera	2.2	56.5	1.4	3.2	0.7	22.1	0.8	3.2
El Toro	2.0	52.3	1.6	3.1	0.6	12.7	0.5	3.1
Las Mercedes	1.9	57.6	1.4	3.8	1.0	19.5	0.8	3.8
SG1	1.5	69.5	1.3	2.1	0.6	15.4	0.5	2.1
SG2	1.8	63.4	1.3	2.3	0.6	18.3	0.5	2.3
SG3	1.6	69.4	1.3	2.3	0.6	17.5	0.5	2.3
SG4	1.4	82.9	1.3	2.1	0.6	13.8	0.5	2.1
SG5	1.5	70.8	1.3	2.4	0.6	15.3	0.5	2.4
SG6	2.4	62.1	1.6	3.9	0.9	18.4	0.8	3.9
SG7	2.2	62.3	1.4	3.0	1.1	20.0	0.8	3.0
SG8	2.3	58.4	1.4	3.6	0.8	19.7	0.8	3.6
SG9	1.7	53.8	1.4	3.4	0.8	19.6	0.8	3.4



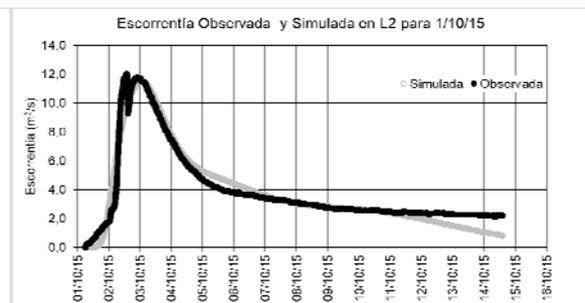
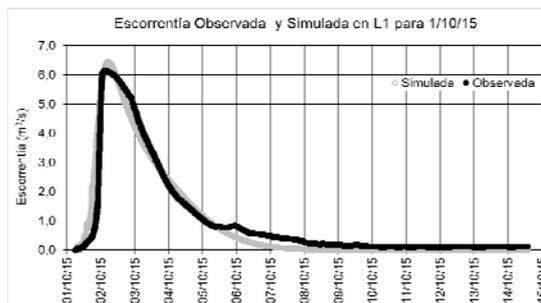
Figuras 25 y 26: De izquierda a derecha, comparación de la escorrentía observada y simulada para las estaciones limnigráfica L1 y L2 para la tormenta del 11/07/15.



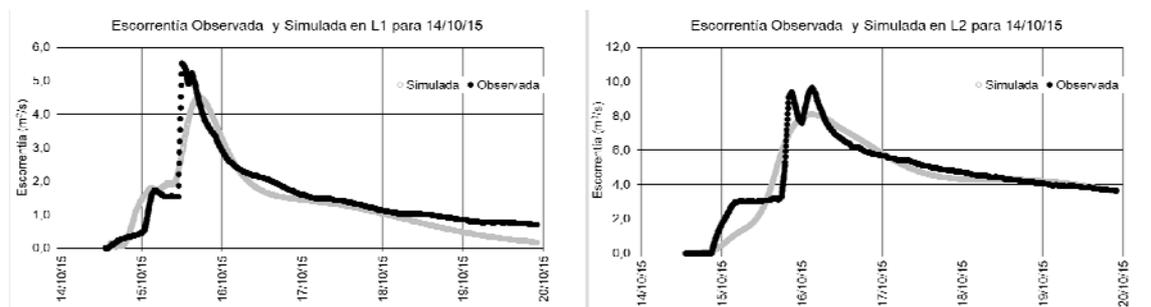
Figuras 27y 28: De izquierda a derecha, comparación de la escorrentía observada y simulada para las estaciones limnigráfica L1 y L2 para la tormenta del 30/07/15.



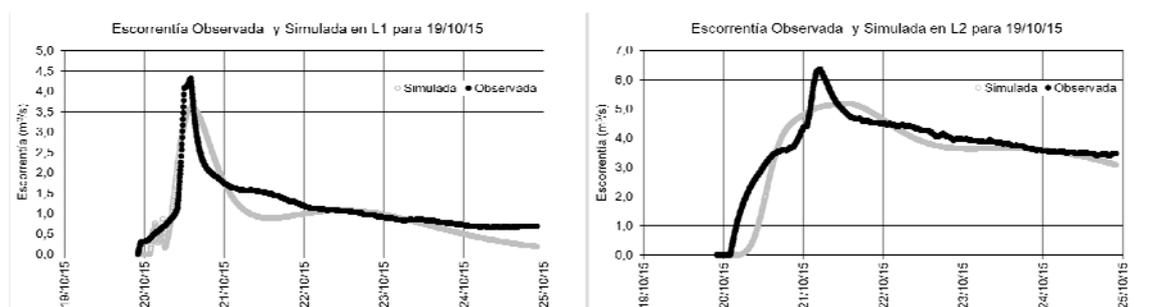
Figuras 29 y 30: De izquierda a derecha, comparación de la escorrentía observada y simulada para las estaciones limnigráfica L1 y L2 para la tormenta del 21/09/15.



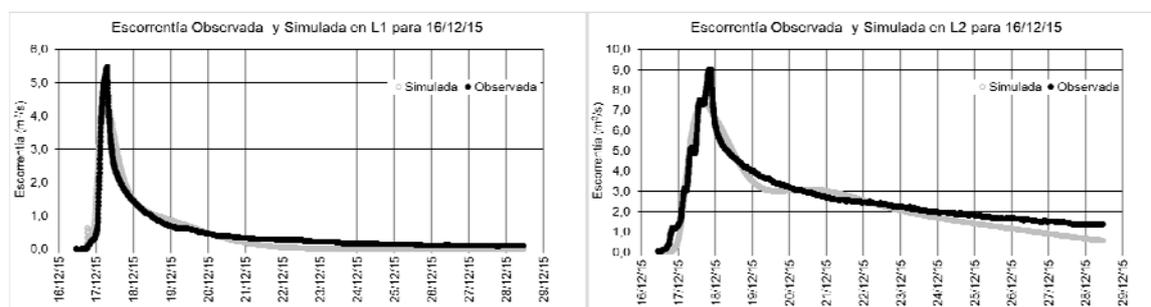
Figuras 31 y 32: De izquierda a derecha, comparación de la escorrentía observada y simulada para las estaciones limnigráfica L1 y L2 para la tormenta del 1/10/15.



Figuras 33 y 34: De izquierda a derecha, comparación de la escorrentía observada y simulada para las estaciones limnigráfica L1 y L2 para la tormenta del 14/10/15.



Figuras 35 y 36: De izquierda a derecha, comparación de la escorrentía observada y simulada para las estaciones limnigráfica L1 y L2 para la tormenta del 19/10/15.



Figuras 37 y 38: De izquierda a derecha, comparación de la escorrentía observada y simulada para las estaciones limnigráfica L1 y L2 para la tormenta del 16/12/15.

Se verifica una gran variación del volumen de escorrentía en función del estado inicial de humedad de la cuenca. Por ejemplo, en la tormenta del 30/07/15 se produjo una cantidad de agua caída mayor que la del 19/10/15 (Tabla 2). Sin embargo, el volumen de escorrentía es menor en la tormenta del 30/07/15 que en la del 19/10/15. La explicación se encuentra en el efecto residual de lluvias producidas con anterioridad a cada evento y el intervalo entre los eventos en consideración. Precisamente la tormenta del 19/10/15 viene precedida de otras dos tormentas con un intervalo menor a 20 días, y la curva de recesión aún no había llegado a su valor mínimo cuando se produjo una nueva precipitación.

Los valores de ajuste correspondientes a CN varían entre 32 y 98. Los promedios y desvíos son

mostrados en Tabla 7. La variabilidad está ligada a las características naturales de la humedad inicial de la cuenca, pero también a los usos del suelo. En la zona más llana, la actividad agropecuaria ejerce una importante influencia en la escorrentía, ya que se siembra siguiendo curvas de nivel, lo que aumenta la retención del agua en el suelo.

La gran variabilidad presentada debe ser contemplada por medio de escenarios diferentes. Por ejemplo, sequía o cuenca casi saturada. De esta manera se toma en cuenta las precipitaciones anteriores y el intervalo entre tormentas, ya que esta circunstancia lleva a obtener valores de volúmenes de escorrentía muy diferentes que ingresan en su totalidad al embalse Paso de las Piedras. Para la definición de estos escenarios es necesario continuar

con las mediciones y lograr establecer con mayor certeza la variación de los parámetros influidos por el estado inicial de la cuenca.

Fernández et al. (2021) obtuvieron dispersiones en la hora en que se produce el pico de la crecida, para la cuenca correspondiente a la estación limnigráfica L1 (Sector superior de la CASG), de 240 minutos de atraso y 140 minutos de adelanto, lo cual establece la llegada del pico con mayor precisión que en el presente trabajo. Esto se debe fundamentalmente a que los autores contaban con 3 pluviógrafos para los registros de la precipitación en 5 tormentas para una cuenca más pequeña. La mejor descripción de la distribución areal de la precipitación produce un ajuste más preciso del parámetro analizado. Sin embargo, contando con dos estaciones pluviométricas, los resultados se consideran satisfactorios.

CONCLUSIONES

Se demuestra que el programa HEC-HMS, correctamente calibrado, es una herramienta adecuada para la simulación de la escorrentía superficial en la CASG a pesar de la variabilidad en la respuesta hidrológica de la misma. Asimismo, se puede ver que con solo dos estaciones pluviográficas se puede simular satisfactoriamente el caudal del pico y el volumen de escorrentía superficial de lluvias caídas en la zona de estudio. Es necesario aclarar que las crecidas aforadas y modeladas ocuparon solo la sección principal del cauce sin desbordar más allá de la planicie de inundación próxima. Por lo tanto, las tormentas simuladas corresponden a frecuencias ordinarias.

La simulación produjo ajustes entre muy buenos y excelentes de los hidrogramas de escorrentías reales en cada estación limnigráfica. Se presentan valores de los parámetros de ajuste que simulan el hidrograma de escorrentía superficial satisfactoriamente. Sumado a esto, la simulación provee además hidrogramas para todas y cada una de las subcuencas de la zona estudiada, lo cual redundará en beneficio de diversos proyectos en el área como ser azudes para contención de crecidas, o reservorios para recreación, consumo humano y/o disponibilidad de agua para enfrentar los frecuentes incendios forestales, alcantarillas, puentes, manejo del agua para el embalse Paso de las Piedras etc.

Se presentan valores de Constantes de Recesión y

Factores de Agotamiento correspondientes a los hidrogramas de crecidas registradas en las estaciones limnigráficas utilizadas. No se ha encontrado referencias de estos valores en la bibliografía consultada, convirtiéndolos en un aporte genuino y único hasta el momento de las características hidrológicas de la CASG.

A pesar de la importancia que la CASG posee, excepto Fernández et al, (2019) y Fernández et al. (2021), no se han encontrado antecedentes de simulaciones en la bibliografía. Por lo tanto, lo expuesto en este trabajo resulta novedoso para el conocimiento de la hidrología de la zona sudoeste de la Provincia de Buenos Aires.

AGRADECIMIENTOS

El presente estudio fue financiado por la Secretaría General de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional del Sur (UNS) con fondos correspondientes al proyecto de investigación “Cuenca del sur de la región pampeana. Hidrología, calidad y modelización de los recursos hídricos. Fase III”. Los autores desean agradecer al Ingeniero Civil Mario Sequeira y al Dr. Walter Melo por su colaboración para la concreción de este trabajo y al Laboratorio de Hidráulica (UNS) y el Centro de Recursos Naturales Renovables de la Zona Semiárida (CERZOS) como fuente de datos.

REFERENCIAS

- Aduriz, M. A., Gargano, A. O., Chimeno, P., Saldungaray, M. C. y Conti, V. P. (2003). Caracterización de los agrosistemas predominantes de la cuenca alta del Río Sauce Grande. *Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 32 (3), 3-26.
- Chow, V. T., Maidment, D. R. y Mays, L. W. (1994). *Hidrología Aplicada*. Bogotá, Colombia: McGraw Hill Interamericana.
- Cunge, J. A. (1969). On the Subject of a Flood Propagation Computation Method (Muskingum Method). *Journal of Hydraulic Research*, 7(2), 205-230.
- Espósito, M. 2014. *Hidrología e hidroquímica de la cuenca del arroyo El Divisorio, provincia de Buenos Aires*. Tesis Doctoral <http://repositoriodigital.uns.edu.ar/handle/123456789/3635>.
- Fernández, S., Pérez, D., Brandizi, L. Serralunga, M., Weis, C. y Abalo, P. (2019). Avances en la

- modelación del escurrimiento superficial de una cuenca del sudoeste bonaerense. Caso de estudio: Sector Superior Cuenca Alta del Río Sauce Grande (Argentina). *Revista Universitaria de Geografía*, 28 (2), 11-32.
- Fernández, S., Pérez, D., Weis, C., Flores, M. A. y Abalo, P. (2021). Validación de simulaciones de tormentas en el Sector Superior de la Cuenca Alta del Río Sauce Grande (Argentina). *Revista Universitaria de Geografía*, 30(1), 43-76.
- Gil, V. (2009). *Hidrogeomorfología de la cuenca alta del río Sauce Grande aplicada al peligro de crecidas*. Tesis Doctoral <http://catalogo.uns.edu.ar/vufind/Record/oai:repositorio.bc.uns.edu.ar:123456789-2069>
- Gómez-Isidro, S., Gómez-Ríos, V. (2016). Baseflow analysis using master recession curves and numerical algorithms in mountain basins: Suratá's river and Oro's river (Santander, Colombia). *DYNA*, 83 (196), 213-222.
- Hydrologic Engineering Center (2000). Hydrologic Modeling System HEC-HMS. Reference Manual. Davis, California: U. S. Army Corps of Engineers.
- Hydrologic Engineering Center (2016). Hydrologic Modeling System HEC-HMS. User's Manual, Version 4.2. Davis, California: U. S. Army Corps of Engineers.
- INDEC (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos) (2001). Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas. INDEC <https://www.indec.gov.ar/indec/web/Nivel4-Tema-2-41-134>.
- INDEC (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos) (2010). Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas. INDEC <https://www.indec.gov.ar/indec/web/Nivel4-Tema-2-41-135>.
- López Cazorla, A., Durán, W. y Tejera, L. (2003). Alimentación de la ictiofauna del río Sauce Grande, provincia de Buenos Aires, Argentina. *Biología Acuática*, 20, 73-79.
- Luque, J. A., Paoloni, J. D. y Bonorino, G. A. (1979). Estudio hidrológico e hidrogeológico de la cuenca del río Sauce Grande. S. Hidrología 3. Departamento de Ciencias Agrarias y de Ciencias Naturales. Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina.
- Molnar, P. (2011). Calibration. Watershed Modelling, SS 2011. Institute of Environmental Engineering. ETH Zürich, Zürich, Switzerland.
- Nash, J. E. y Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models: Part I. A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10(3), 282-290.
- Rabassa, J. (1982). Variación regional y significado geomorfológico de la densidad de drenaje en la cuenca del Río Sauce Grande, Provincia de Buenos Aires. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 37(3), 268-284.
- Schefer, J. C. (2004). Los recursos hídricos y el abastecimiento de agua. Región de Bahía Blanca. Bahía Blanca, Argentina: CEPADE (Centro de Estudios y Participación para el Desarrollo Local y Regional).
- USACE(1994). EM 1110-2-1417 Flood-Runoff Analysis. Department of the Army U.S. Army Corps of Engineers Washington, DC 20314-1000
- Vouilloud, A. A., Sala, S. E. y Sabbatini, M. R. (2005). Diatomeas perifíticas de la cuenca del Río Sauce Grande (Buenos Aires, Argentina). *Iheringia. Série Botânica*, 60(1), 77-89.

Tipo de Publicación: ARTICULO.

Trabajo recibido el 17/11/2021 y aprobado para su publicación el 20/04/2022.

COMO CITAR

Fernández, S. N.; Pérez, D. E.; Weis, C. F.; y Flores, M.A. (2022). Calibración de simulaciones de crecidas de la cuenca alta del río Sauce Grande, Provincia de Buenos Aires, Argentina. *Cuadernos del CURIHAM*, 28, 25-42. doi: <https://doi.org/10.35305/curiham.v28i.179>

Este es un artículo de acceso abierto bajo licencia: Creative Commons Atribución -No Comercial -Compartir Igual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>)

