

Validación de simulaciones de tormentas en el Sector Superior de la Cuenca Alta del Río Sauce Grande (Argentina)

Sandra N. Fernández*

Daniel E. Pérez**

Carlos F. Weis***

Miguel A. Flores°

Pablo O. Abalo°°

Resumen

El desarrollo e implementación de modelos hidrológicos que simulen los procesos en las cuencas hidrográficas se revela como estratégico para el manejo del agua. Se presenta la validación de un modelo hidrológico para el sector superior de la cuenca alta del Río Sauce Grande. Se seleccionan siete tormentas registradas por tres pluviógrafos en la zona y sus correspondientes hidrogramas, medidos en una estación limnigráfica sobre el Sauce Grande, de ley h-Q conocida. Se extrajo el caudal base a partir de un algoritmo estocástico. Fueron utilizadas cinco tormentas a manera de calibración y dos para validar. Se consideran cuatro parámetros de ajuste relacionados con el estado inicial de humedad de la cuenca y la capacidad de retención tanto del suelo como de la vegetación. Los coeficientes Nash-Sutcliffe obtenidos indican muy buenos a excelentes valores de calidad del ajuste, tanto para tormentas calibradas como validadas.

Palabras clave: Río Sauce Grande, Escorrentía superficial, Simulación de crecidas, Modelo hidrológico, HEC-HMS.

* Docente del Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur, Avenida Alem 1253, Bahía Blanca, Argentina. sfernand@uns.edu.ar / Investigador Asociado de la Comisión de Investigaciones Científicas (CIC). Calle 526 e/10 y 11. La Plata.

** Docente del Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur, Avenida Alem 1253, Bahía Blanca, Argentina. perezdanielenrique@gmail.com

*** Técnico Laboratorio de Hidráulica del Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina. cweis@uns.edu.ar

° Técnico Laboratorio de Hidráulica del Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina. miguel.flores@uns.edu.ar

°° Técnico Laboratorio de Hidráulica del Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina. pabalo@uns.edu.ar

Storm Validation of simulations on the uppermost Sector of the High Sauce Grande River Basin (Argentina)

Abstract

The development and implementation of hydrological models that simulate watershed processes is strategic for water management. The validation of a hydrological model for the upper sector of the basin of the Sauce Grande River is presented. Seven storms recorded by three rain gauges in the area and their corresponding hydrographs, measured at a limnigraphic station on the Sauce Grande, of known h-Q law, were selected. The base flow was extracted from a stochastic algorithm. Five storms were used for calibration and two for validation. Four adjustment parameters related to the initial moisture state of the basin and the retention capacity of both soil and vegetation were considered. The Nash-Sutcliffe coefficients obtained indicate very good to excellent values of the quality of the adjustment for both, calibrated and validated storms.

Keywords: Sauce Grande River, Surface runoff, Flood simulation, Hydrologic model, HEC-HMS.

Introducción

La Cuenca Alta del Río Sauce Grande (CASG) resulta de fundamental importancia en la región del Sudoeste bonaerense (Figs. 1a y 1b). A los fines del presente trabajo, se define CASG desde su nacimiento en el Sistema de Ventania hasta la ex toma de agua de Aguas Corrientes de Obras Sanitarias, la cual se encuentra aguas arriba del Embalse Paso de las Piedras. Su cuenca abarca una superficie de 861 km² y en ella el río recorre 66 km. El río transita una zona de producción agrícola-ganadera (Aduriz, Gargano, Chimeno, Saldungaray y Conti, 2003) y presenta una creciente actividad turística. Además, es el principal aporte de agua al embalse del dique Paso de las Piedras, que es la principal fuente de agua potable para Bahía Blanca, Punta Alta y la zona.

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. Lluvias torrenciales acumularon 284 mm desde las 19:30 h del 6 de octubre hasta la noche del 7 de octubre de 1944. 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 esa oportunidad, las lluvias registraron máximos para el sector serrano de 290 mm en dos días y alcanzaron intensidades, en algunos períodos, de 2 mm por minuto. 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 comarca serrana (sector superior de la CASG). El principal problema, al momento de combatir los incendios de este tipo, es el acceso al agua. Para enfrentar este problema, la solución 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.

No se ha encontrado ningún estudio de simulaciones ni validaciones de lluvias-escorrentías para la CASG en la bibliografía consultada. Además, son escasos los datos de precipitaciones, caudales, calidad del agua y transporte de sedimentos.

En este trabajo, se implementa el HEC-HMS en su versión 4.2.1 al modelo hidrológico del sector superior de la CASG. Espósito (2014) calibró un modelo hidrológico 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. El modelo reproduce satisfactoriamente el comportamiento hidrológico, lo que resulta en una herramienta útil para la estimación de caudales y volúmenes de escorrentías ante la ocurrencia de distintos eventos en la cuenca.

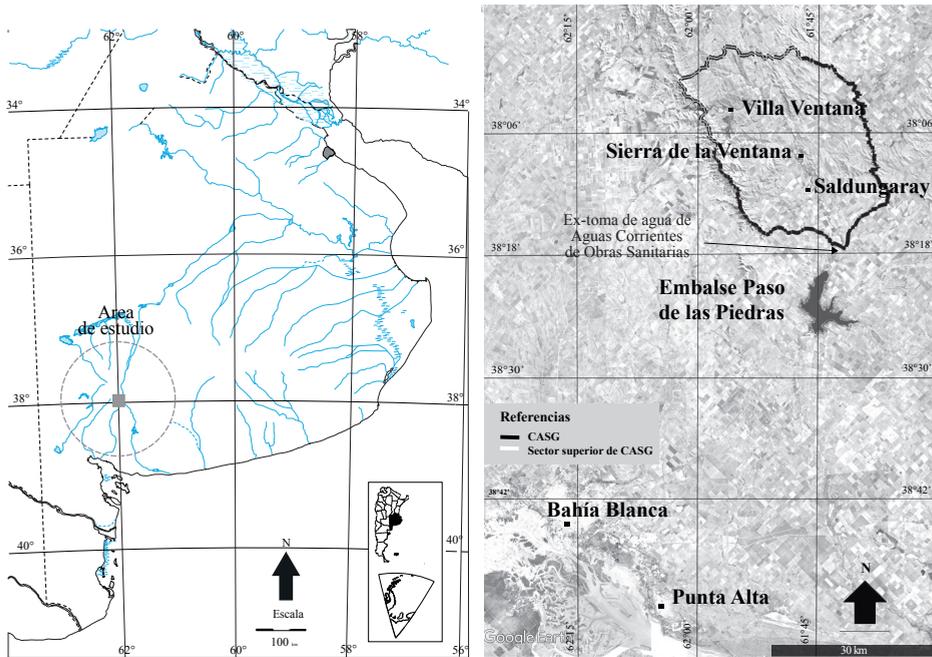


Figura 1. a) Ubicación del área de estudio. b) CASG y sector superior de la CASG. Fuente: 1a) elaborado por Fernández et al. (2021) sobre la base de Fernández et al. (2019); 1b) elaborado por Fernández et al. (2021) sobre la base de Google Earth y cartas del Instituto Geográfico Nacional (Escala 1:50.000).

Fernández et al. (2019) implementaron el HEC-HMS al modelo hidrológico del sector superior de la CASG, logrando calibrar cinco tormentas. En el presente trabajo, se adopta la misma cuenca que en la mencionada publicación, pero se amplía

la base de datos (tres pluviógrafos en vez de uno) y se cambia la metodología de extracción del escurrimiento base. Por esta circunstancia, se procedió a

1. ajustar los valores calibrados por Fernández et al. (2019) de las cinco tormentas iniciales considerando la nueva base de datos y metodología propuesta;
2. validar otras dos tormentas.

Se plantea como objetivo de este trabajo validar una herramienta hidrológica para simular lluvias de diseño en el sector superior de la CASG. Como consecuencia, se contará con un modelo validado para: la gestión del agua en la región, planificación de obras civiles en el área (por ejemplo, pequeñas presas para consumo de agua y/o recreación, reservas para atacar incendios de verano, defensas contra inundaciones, controles de crecida, alcantarillas, puentes, etc.), dar sustento a simulaciones de calidad de agua, escenarios de cambio climático, etc. En definitiva, una herramienta hidrológica como la que se está desarrollando podrá aportar sustancialmente al progreso de la zona.

Materiales y métodos

Área de estudio

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 (Figs. 1a y 1b). Su cuenca total es la más importante del sudoeste bonaerense con un área total de 4609 km² (Gil, 2009).

El área de estudio corresponde al sector superior de la CASG (Fig. 1b) que corresponde a la cuenca de drenaje cuyo punto de cierre coincide con la Estación Limnigráfica L1 instalada sobre el cauce principal del río Sauce Grande a 50 km aguas arriba del embalse Paso de las Piedras. La superficie de aporte total es de 177 km². En su recorrido dentro de la cuenca en estudio, el cauce principal recibe el aporte de diversos afluentes: arroyos del Abra, El Atravesado y Mambaches sobre su margen izquierda, y arroyos Horqueta del Sauce, Destierro Primero, de los Remansos y del Oro sobre su margen derecha (Fig. 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 y Peralta con equidistancias de 25 m y Sierra de Las Tunas y Tornquist con equidistancia de 10 m. Sobre esta base, se realizó un Modelo Digital

de Terreno (MDT) utilizando la herramienta AutoCAD, la cual genera una red de triángulos irregulares cuyos vértices son los puntos digitalizados de las cartas. La cota de la superficie es el promedio de las alturas de los vértices de los triángulos donde el punto considerado yace. Se complementó la información con imágenes satelitales provenientes de Google Earth. La georreferenciación de las estaciones meteorológicas y limnigráfica se realizó mediante un GPS Garmin 276C (con altimetría).

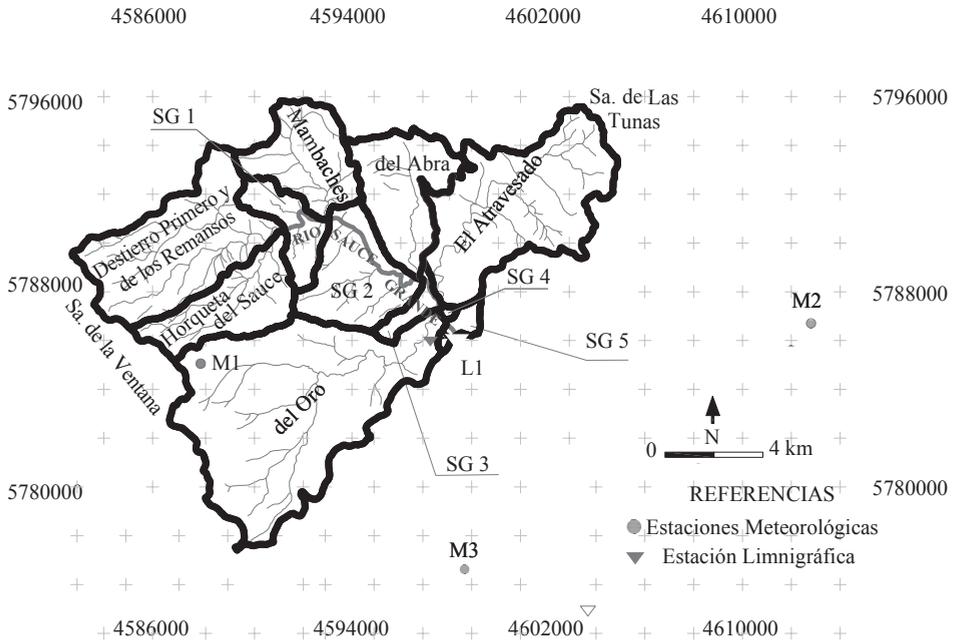


Figura 2. Cuenca de estudio, estaciones de medición y delimitación de subcuencas. Fuente: elaborado por Fernández et al. (2021) sobre la base de Fernández et al. (2019) y sobre cartas topográficas del Instituto Geográfico Nacional (Escala 1:50.000).

Monitoreo hidrometeorológico

Tres pluviógrafos ubicados en la zona proveyeron los datos de precipitaciones (Tabla I y Fig. 2). Los mismos miden 0,3 mm de columna de agua por cada caída de cubetas basculantes. Los datos de precipitación se registraron cada quince minutos. La Estación Limnigráfica L1 (Tabla I y Fig. 2) proporcionó mediciones de nivel de agua superficial cada hora. Las figuras 3a, 3b, 3c, 4a y 4b ilustran las estaciones meteorológicas mencionadas y la estación limnigráfica L1, respectivamente.

El limnógrafo marca Génica Ingeniería —modelo LF 324— posee un rango de medición de 0 a 8 m con una resolución de 0,002 m. El equipo es alimentado con una batería de 12 V, graba los registros en una memoria no volátil, los cuales pueden ser recuperados desde un puerto USB a una PC.

Las estaciones meteorológicas automáticas son marca Weather Station —modelo WS 1081—. Las mismas cuentan con sensores de lluvia (pluviógrafo), velocidad del viento, dirección del viento, humedad relativa externa, temperaturas externa e interna, humedad interna y presión atmosférica. Los datos se transmiten por medio de radiofrecuencia cada 48 segundos hacia una consola ubicada a menos de 100 metros. El equipo permite seleccionar alarmas y rangos de valores máximos o mínimos. Los datos son almacenados en una memoria no volátil y pueden ser recuperados a través de un puerto USB a una PC.

	Coordenadas Gauss-Kruger		Coordenadas geográficas		Elevación (m s. n. m.)
	(Zona 4-Campo Inchauspe)				
Tipo de estación	X (m)	Y (m)	Latitud (Sur)	Longitud (Oeste)	
Limnográfica L1	5788024.364	4600254.236	38° 03' 15,81"	61° 51' 30,77"	300
Meteorológica M1	5787918.08	4589627.462	38° 03' 23,26"	61° 58' 46,53"	580
Meteorológica M2	5787257.625	4614074.829	38° 03' 34,79"	61° 42' 3,59"	315
Meteorológica M3	5776104.149	4598289.238	38° 09' 43,11"	61° 52' 45,46"	370

Tabla I. Latitud, longitud y elevación de las estaciones utilizadas.

Fuente: elaborado por Fernández et al. (2021) sobre la base de relevamiento en campo.

Procesamiento de datos de precipitación

El método de Thiessen establece que en cualquier punto de la cuenca la lluvia es igual a la que se registra en el pluviómetro más cercano; luego la profundidad registrada en un pluviómetro dado se aplica hasta la mitad de la distancia a la siguiente estación pluviométrica en cualquier dirección. Los pesos relativos de cada pluviómetro se determinan de las correspondientes áreas de aplicación en una red de polígonos de Thiessen, cuyas fronteras están formadas por los bisectores perpendiculares a las líneas que unen pluviómetros adyacentes (Chow, Maidment y Mays, 1994).

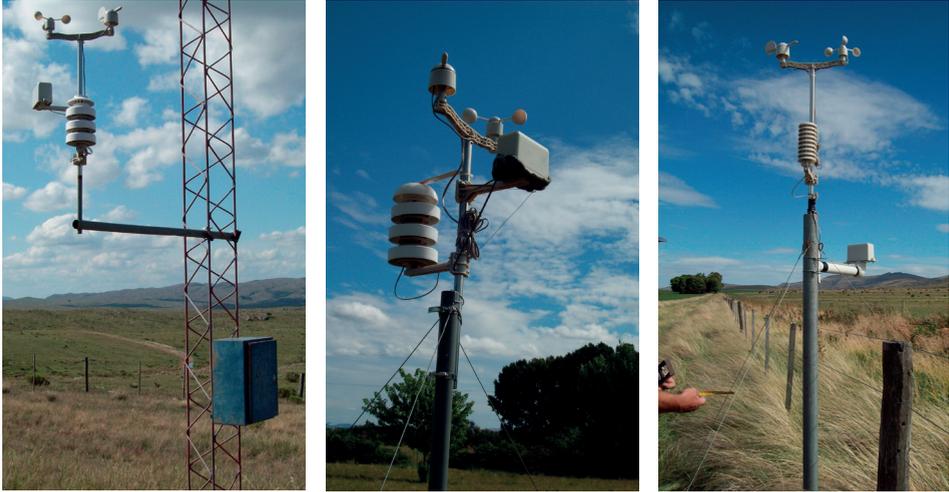


Figura 3. Estaciones Meteorológicas: a) M1, b) M2 y c) M3.
Fuente: elaborado por Fernández et al. (2021).



Figura 4. a) Abrigo y consola de registro Estación Limnigráfica L1, b) Sección de aforo donde se encuentra instalado el sensor de nivel de L1 en el río Sauce Grande.
Fuente: elaborado por Fernández et al. (2021).

Si existen J pluviómetros y el área de la cuenca que se asigna a cada uno de ellos es A_j , y P_j es la lluvia registrada en el pluviómetro j -ésimo, la precipitación promedio para la cuenca sobre el área se calcula con la siguiente ecuación:

$$\bar{P} = \frac{1}{A} \sum_{j=1}^J A_j * P_j$$

donde el área de la cuenca es:

$$A = \sum_{j=1}^J A_j.$$

Por lo tanto, se aplica el método de los polígonos de Thiessen a las tormentas bajo análisis, registradas en los tres pluviógrafos de sus respectivas estaciones meteorológicas instaladas en la zona, a fin de cuantificar la fracción de la lámina de agua en cada subcuenca al momento considerado (Fig. 5).

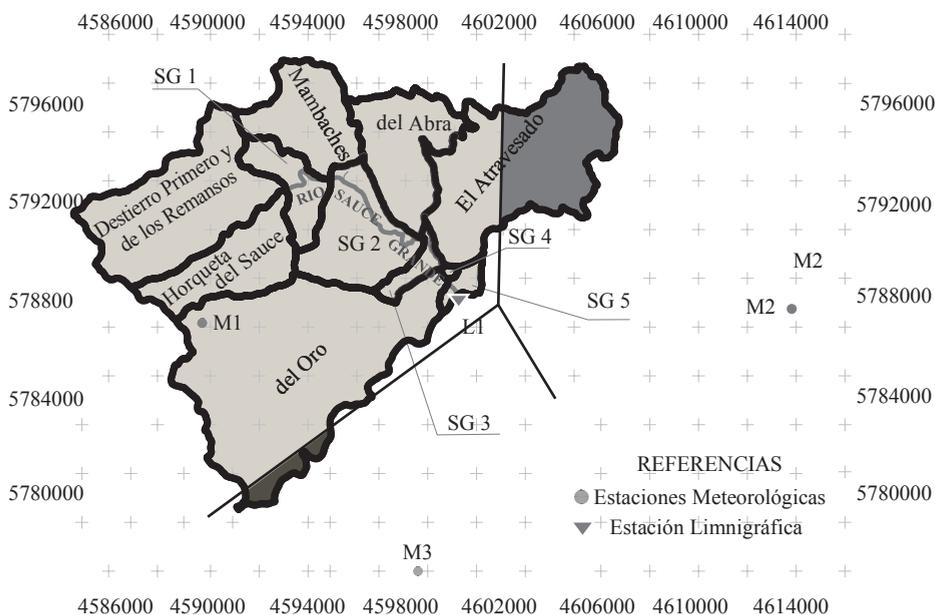


Figura 5. Área de influencia de los pluviógrafos de las estaciones M1, M2 y M3 para las subcuencas del sector superior de la CASG. Fuente: elaborado por Fernández et al. (2021) sobre la base de Fernández et al. (2019) y sobre cartas topográficas del Instituto Geográfico Nacional (Escala 1:50000).

Procesamiento de datos del hidrograma

Se cuenta con la curva de altura caudal o curva h-Q en la sección del cauce principal del río correspondiente a la Estación Limnigráfica L1. La misma fue determinada y calibrada mediante relevamientos de secciones transversales y longitudinales con elevaciones y progresivas, aplicación del método área-pendiente y con diez aforos efectuados con molinete en distintos estados del río correspondientes a un rango entre 0,15 y 9 m³/s. 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. Con esta herramienta, se produjeron series de tiempo de caudal en la mencionada sección.

La simulación requiere de 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 la Estación Limnigráfica L1. Se utilizó el algoritmo numérico de un parámetro (Ecuación 1) (Gómez-Isidro y Gómez-Ríos, 2016).

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

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.

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

Donde k (horas^{-1}), es 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 (Ecuación 3), que representa las condiciones físicas de la cuenca y propiedades del hidrograma (Gómez-Isidro y Gómez-Ríos, 2016).

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

Implementación del modelo hidrológico por medio de 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 (Fig. 6). Se optó por el modelo de número de curva (CN) del Soil Conservation Service

(SCS), que estima el exceso de agua caída, en base a la precipitación acumulada, la cubierta del suelo, el uso del suelo y la humedad antecedente. Para la transformación de precipitación en escorrentía se usa el modelo del hidrograma unitario del SCS, con el tiempo de concentración sugerido por Kirpich (Chow et al., 1994) para las subcuencas, y una forma estándar del hidrograma adimensional. Se implementó el método de Muskingum para el tránsito de avenidas. Este método modela el almacenamiento volumétrico de creciente en un río mediante la combinación del almacenamiento de cuña y prisma (Linsley, Kohler y Paulus, 1986).

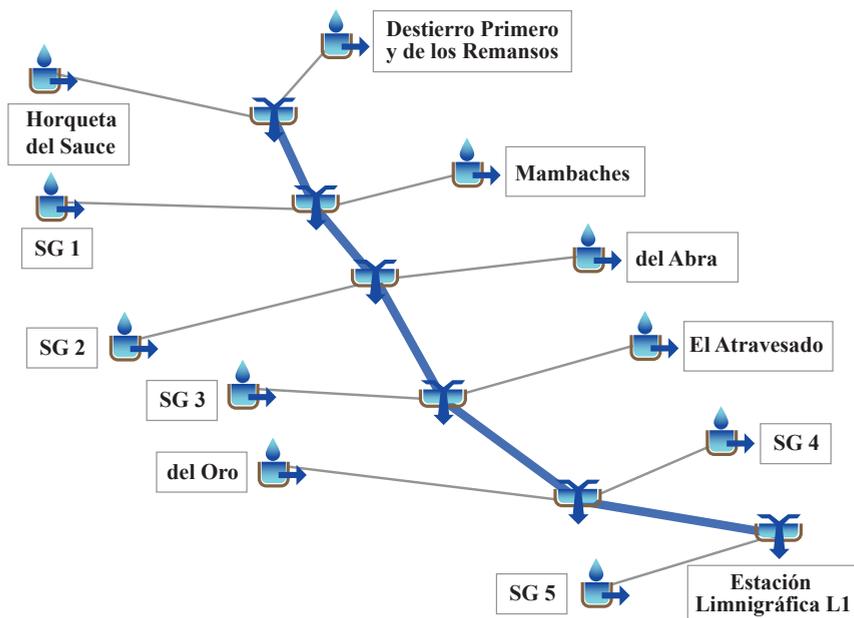


Figura 6. Modelo de la cuenca de estudio estructurada por el programa HEC-HMS.
Fuente: elaborado por Fernández et al. (2021) sobre la base del programa HEC-HMS.

Debido a que se calibran tormentas aisladas, es necesario ajustar los parámetros que contemplan el antecedente de humedad de cada subcuenca, para cada caso. Por ello, para la validación, se ajustaron los siguientes parámetros:

- **CN** (Número de Curva del Soil Conservation Service del United States Department of Agriculture [USDA]) que contempla el tipo de suelo de la cuenca y su humedad inicial. 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. Solo el agua escurre 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.

Tormentas usadas para la calibración

Se adoptan las tormentas correspondientes al 21/09, 01/10, 14/10, 19/10 y 16/12 del 2015 para calibrar el modelo. Las figuras 7 a 11 muestran los hietogramas e hidrogramas observados en cada tormenta y la tabla II muestra los valores de precipitación acumulada en mm para cada pluviógrafo de las tres estaciones meteorológicas y el caudal en el pico en m^3/s del hidrograma observado obtenido a partir de la curva de h-Q.

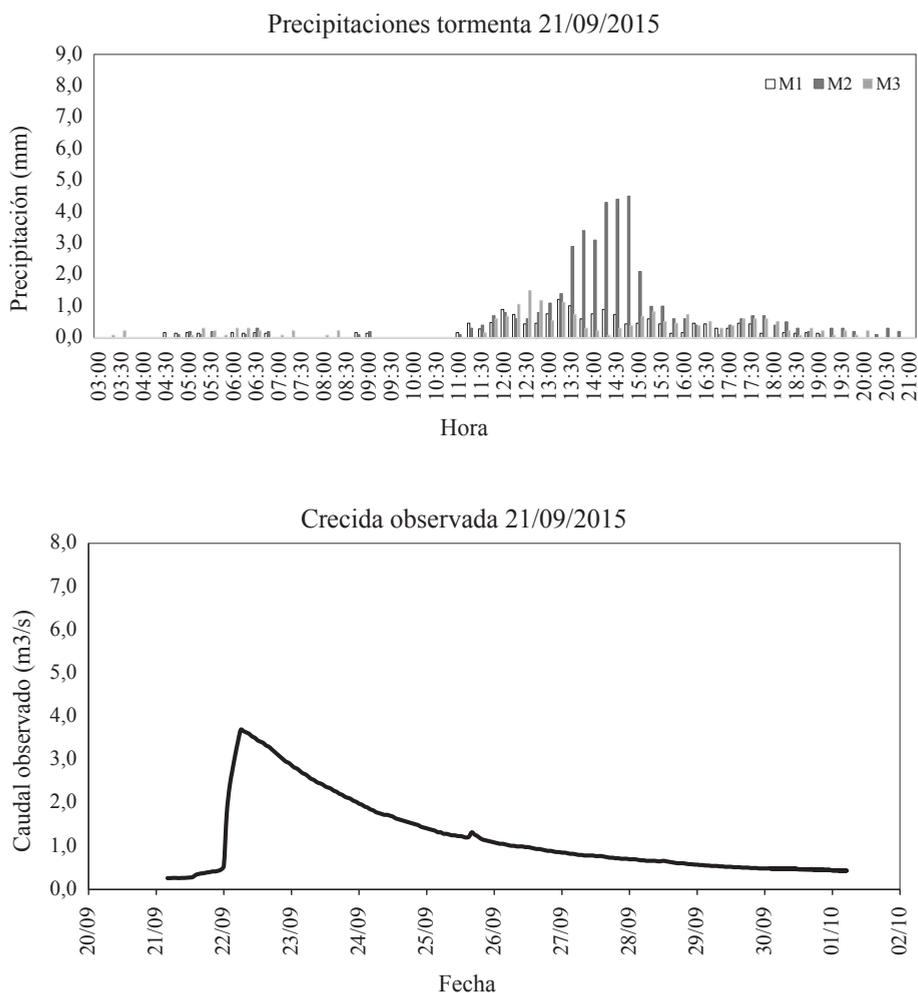


Figura 7. Hietogramas e hidrograma observado registrados en las Estaciones Meteorológicas M1, M2, M3 y la Estación Limnigráfica L1, respectivamente, para la tormenta del 21/09/2015. Fuente: elaborado por Fernández et al. (2021) sobre datos de proyecto.

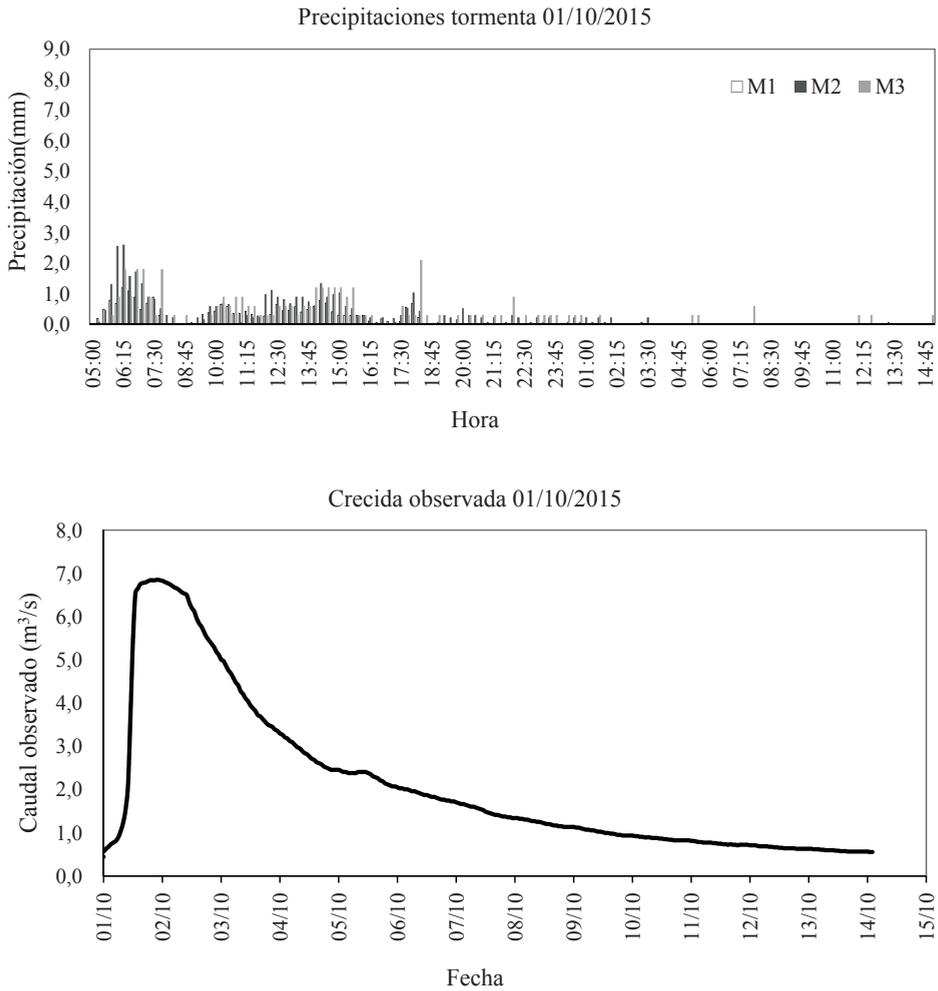


Figura 8. Hietogramas e hidrograma observado registrados en las Estaciones Meteorológicas M1, M2, M3 y la Estación Limnigráfica L1, respectivamente, para la tormenta del 01/10/2015. Fuente: elaborado por Fernández et al. (2021) sobre datos de proyecto.

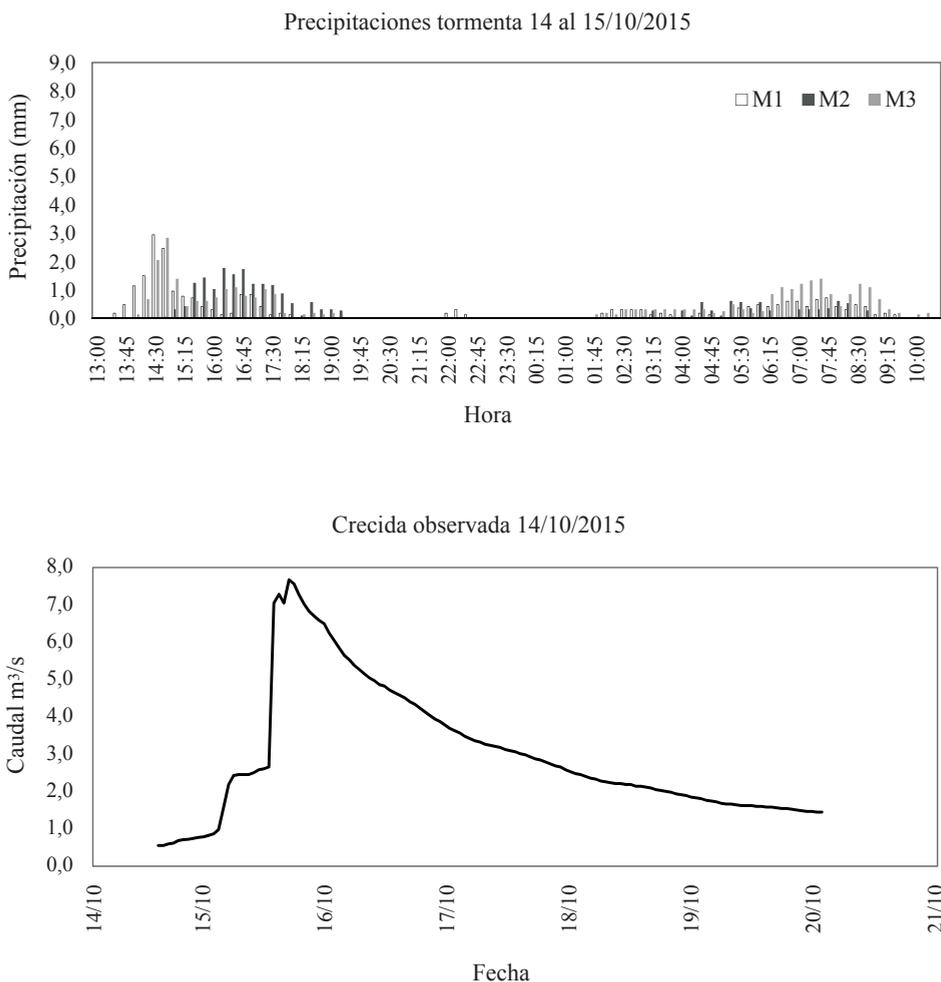


Figura 9. Hietogramas e hidrograma observado registrados en las Estaciones Meteorológicas M1, M2, M3 y la Estación Limnigráfica L1, respectivamente, para la tormenta del 14/10/2015. Fuente: elaborado por Fernández et al. (2021) sobre datos de proyecto.

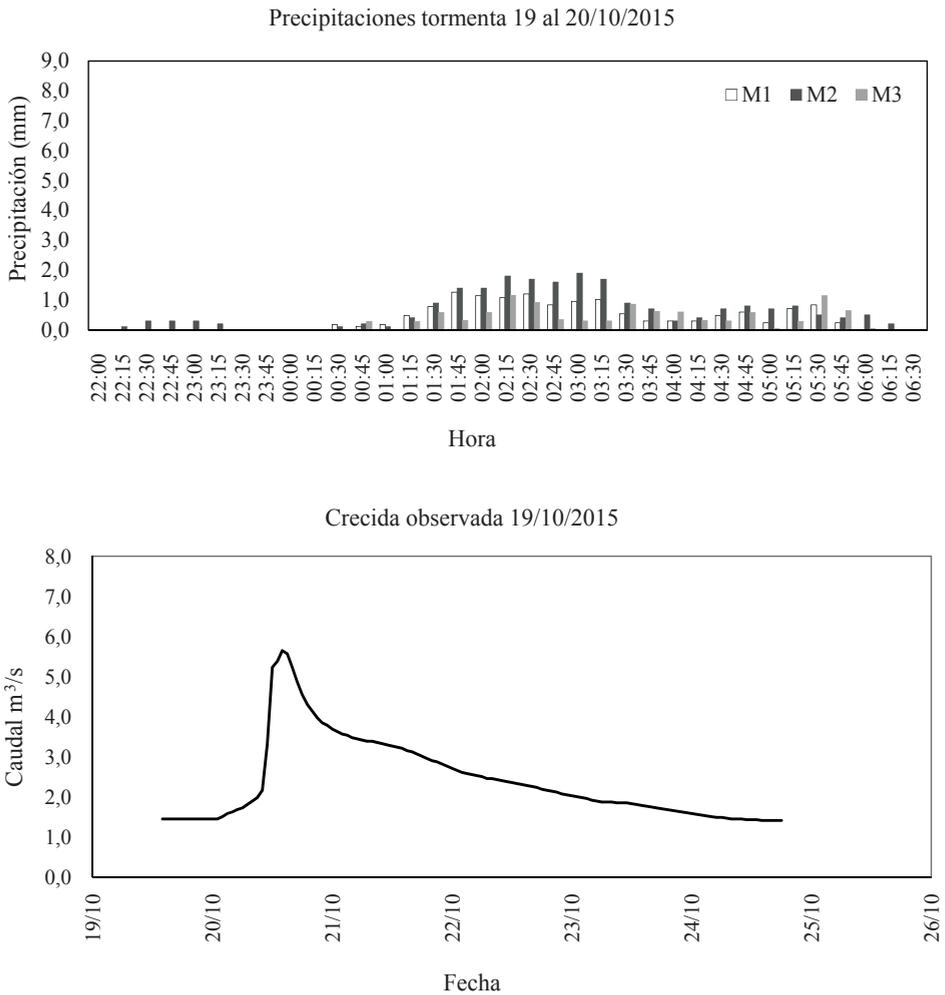


Figura 10. Hietogramas e hidrograma observado registrados en las Estaciones Meteorológicas M1, M2, M3 y la Estación Limnigráfica L1, respectivamente, para la tormenta del 19/10/2015. Fuente: elaborado por Fernández et al. (2021) sobre datos de proyecto.

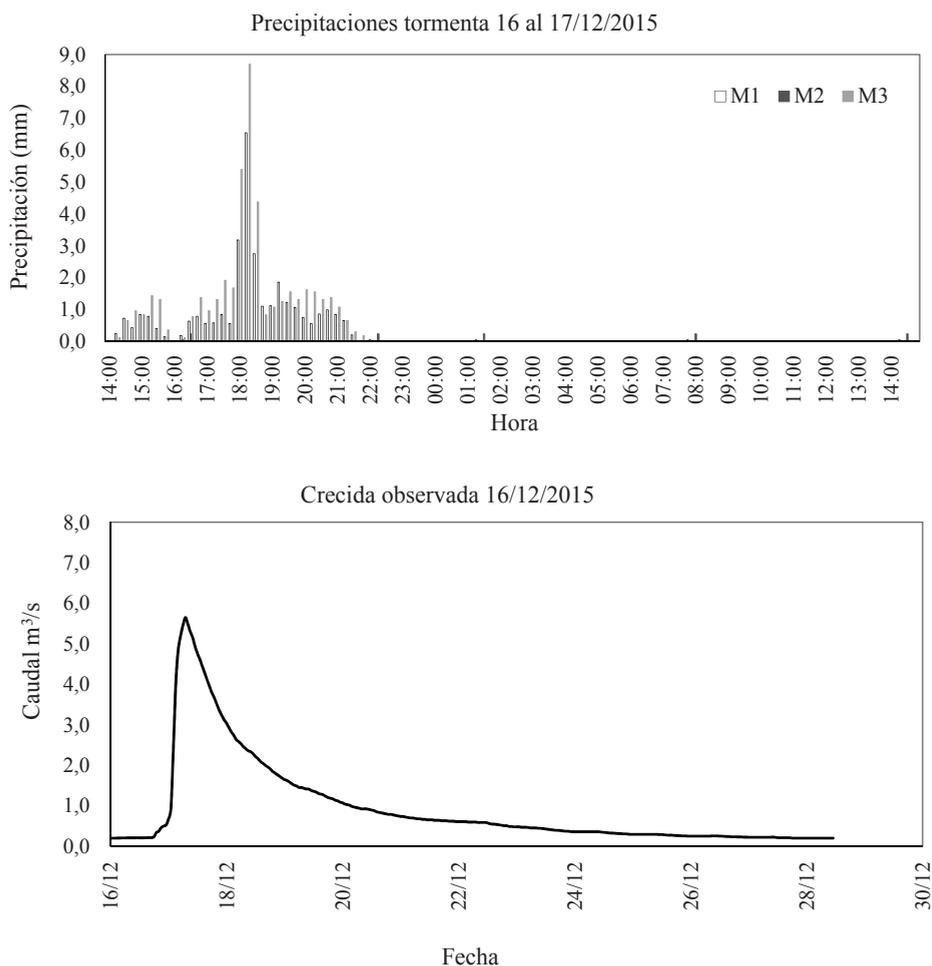


Figura 11. Hietogramas e hidrograma observado registrados en las Estaciones Meteorológicas M1, M2, M3 y la Estación Limnigráfica L1 respectivamente para la tormenta del 16/12/2015. Fuente: elaborado por Fernández et al. (2021) sobre datos de proyecto.

Fecha del evento (calibración)	Precipitación acumulada M1 (mm)	Precipitación acumulada M2 (mm)	Precipitación acumulada M3 (mm)	Caudal en el pico Hidrograma observado (m ³ /s)
21/9/2015	16,8	42	19,8	3,69
1/10/2015	21,9	40	40,8	6,85
14/10/2015	24,6	22,5	33	7,67
19/10/2015	13,8	22,3	10,5	5,65
16/12/2015	31,5	1,5	46,5	5,65

Tabla II. Eventos de tormentas observadas usadas para la calibración: fecha, precipitación acumulada y caudal en el pico del hidrograma total observado.

Fuente: elaborado por Fernández et al. (2021) sobre la base de los datos de las estaciones hidrometeorológicas.

Tormentas usadas para validar

La validación se llevó a cabo sobre las tormentas correspondientes al 30/07 y 07/12 de 2015. Las figuras 12 y 13 muestran los hietogramas e hidrogramas observados. La tabla III muestra los valores de precipitación acumulada en mm para cada pluviógrafo de las tres estaciones meteorológicas y el caudal en el pico en m³/s del hidrograma observado obtenido a partir de la curva de h-Q.

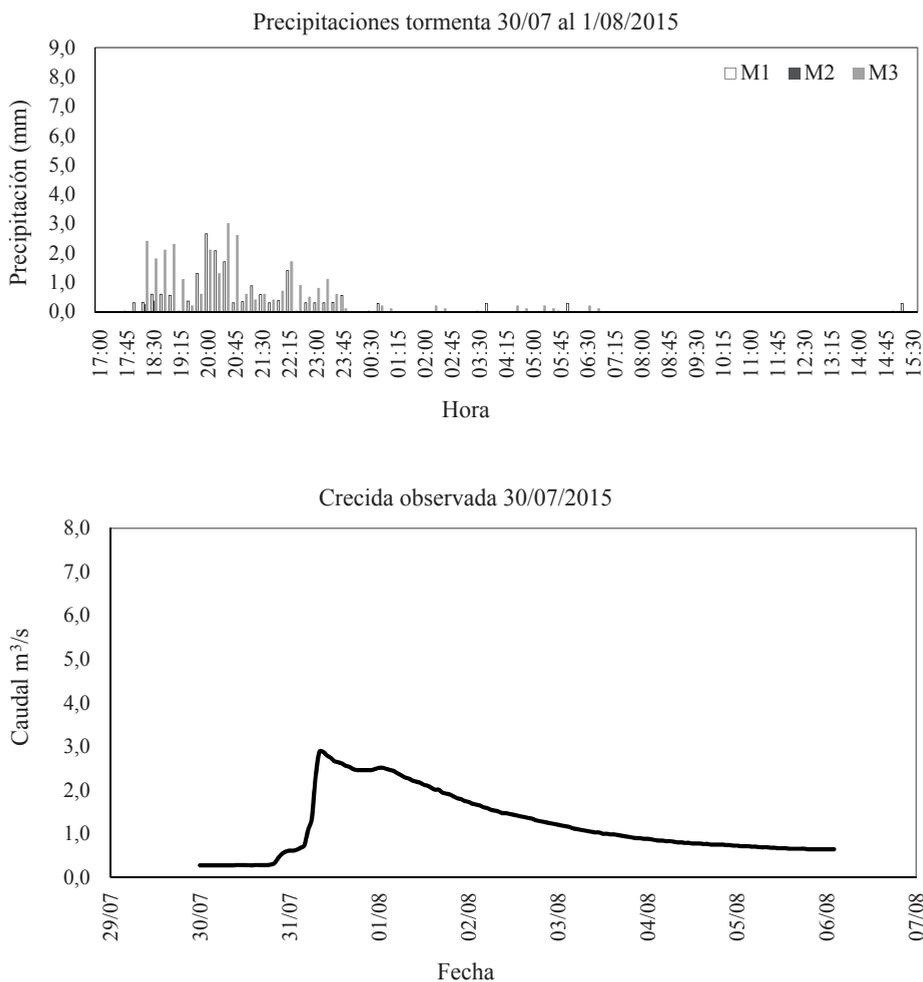


Figura 12. Hietogramas e hidrograma observado registrados en las Estaciones Meteorológicas M1, M2, M3 y la Estación Limnigráfica L1, respectivamente, para la tormenta del 30/07/2015. Fuente: elaborado por Fernández et al. (2021) sobre datos de proyecto.

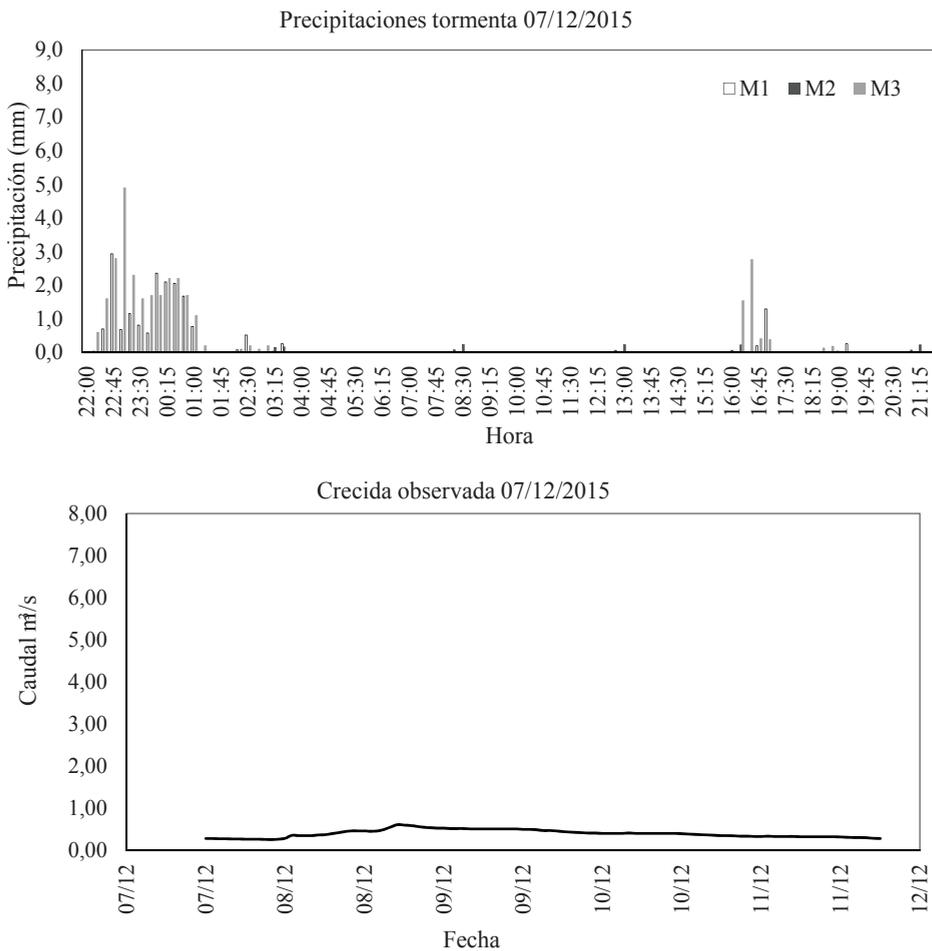


Figura 13. Hietogramas e hidrograma observado registrados en las Estaciones Meteorológicas M1, M2, M3 y la Estación Limnigráfica L1, respectivamente, para la tormenta del 07/12/2015. Fuente: elaborado por Fernández et al. (2021).

Fecha del evento (validación)	Precipitación acumulada M1 (mm)	Precipitación acumulada M2 (mm)	Precipitación acumulada M3 (mm)	Caudal en el pico Hidrograma observado (m ³ /s)
30/7/2015	17,7	0,6	29,4	2,87
7/12/2015	18,6	1,5	30,6	0,62

Tabla III. Eventos de tormentas observadas usadas para la validación: fecha, precipitación acumulada y caudal en el pico del hidrograma total observado.

Fuente: elaborado por Fernández et al. (2021) sobre la base de los datos de las estaciones hidrometeorológicas.

Resulta notable que las tormentas a validar muestran una pequeña diferencia en las precipitaciones acumuladas en cada pluviómetro, menores a 1,2 mm, a favor de la tormenta de diciembre. Sin embargo, el caudal máximo durante la tormenta de diciembre es aproximadamente la quinta parte del escurrido en la tormenta de julio.

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 (E) (Nash y Sutcliffe, 1970), cuya expresión es la siguiente:

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

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. 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 IV.

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

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

Fuente: Molnar (2011).

Resultados

Extracción del flujo base

Se determinaron las pendientes del decaimiento de los hidrogramas de las tormentas usadas para calibrar, según las Ecuaciones 2 y 3 presentadas anteriormente. Los valores del factor de agotamiento, K , y la constante de recesión, k , se muestran en la tabla V:

Fecha de la tormenta	Constante de recesión (hora ⁻¹)	Factor de agotamiento
21/9/2015	0,032	0,97
1/10/2015	0,008	0,99
14/10/2015	0,096	0,91
19/10/2015	0,012	0,97
16/12/2015	0,001	1,00

Tabla V. Valores de la constante de recesión y el factor de agotamiento obtenidos de los hidrogramas asociados a las tormentas usadas para calibración. Fuente: elaborado por Fernández et al. (2021).

La extracción del flujo base de las cinco tormentas usadas para calibrar se realiza a partir de los valores de sus correspondientes de factores de agotamiento (Tabla V) y aplicados a la Ecuación 1. Para la extracción del flujo base de las tormentas a validar (30/07/15 y 07/12/15), se aplica el método estocástico usando un valor promedio de los factores de agotamiento de las tormentas de calibración ($K = 0,97$).

Resultados de la calibración

Los resultados de la calibración de las cinco tormentas seleccionadas se muestran en las figuras 14 a 18.

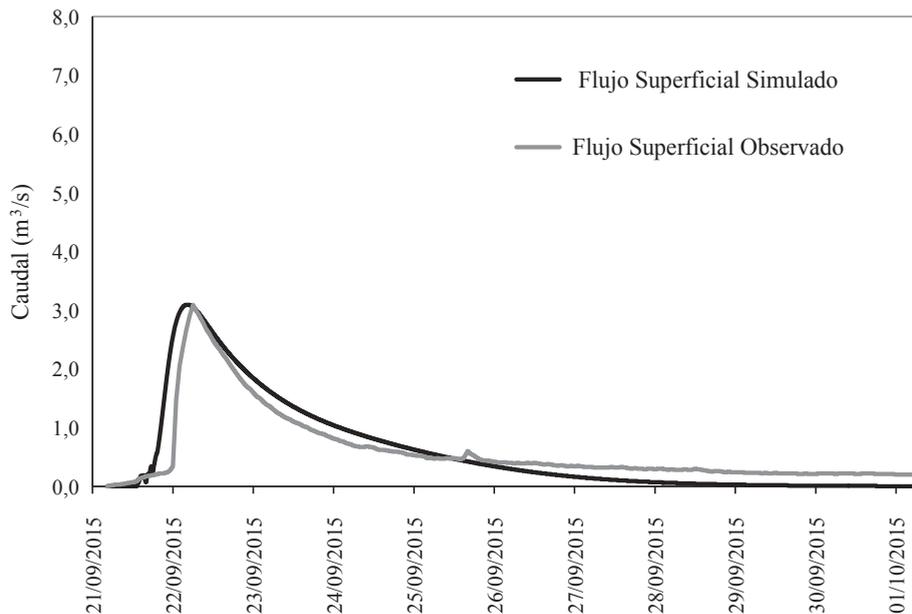


Figura 14. Comparación entre el hidrograma de flujo superficial simulado y HFSO en la Estación Limnigráfica L1 para el evento del 21/09/2015. Fuente: Elaborado por Fernández et al. (2021).

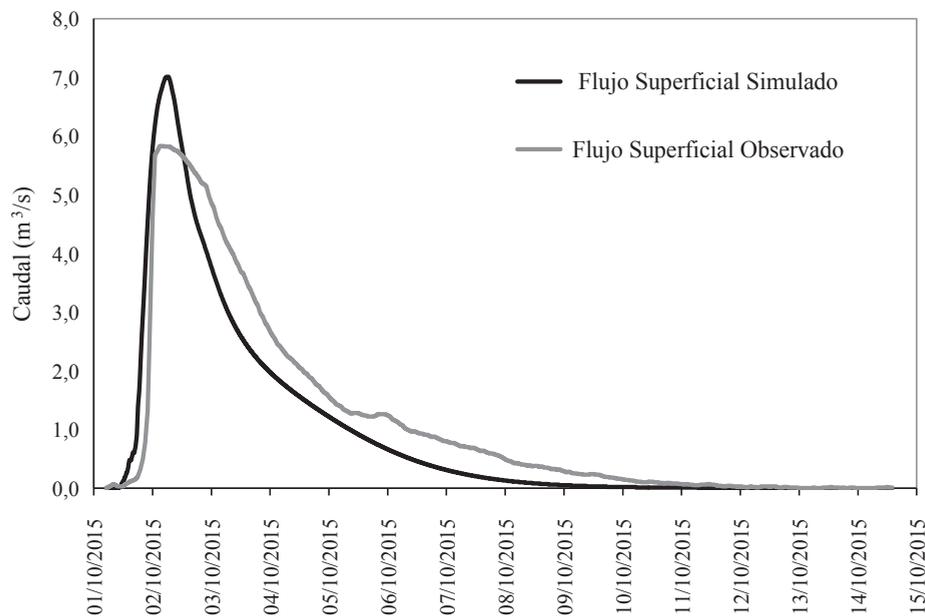


Figura 15. Comparación entre el hidrograma de flujo superficial simulado y HFSO en la Estación Limnigráfica L1 para el evento del 01/10/2015. Fuente: Elaborado por Fernández et al. (2021).

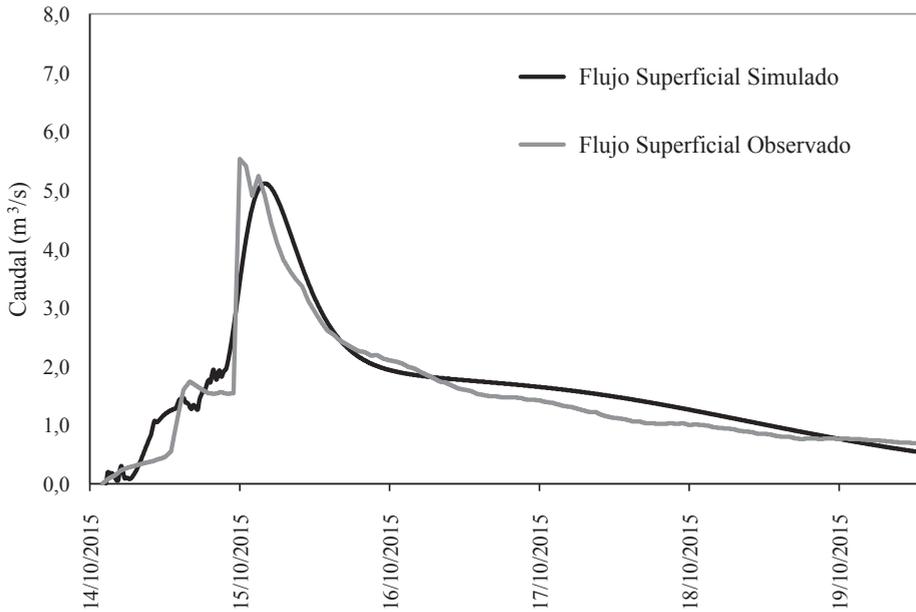


Figura 16. Comparación entre el hidrograma de flujo superficial simulado y HFSO en la Estación Limnigráfica L1 para el evento del 14/10/2015. Fuente: Elaborado por Fernández et al. (2021).

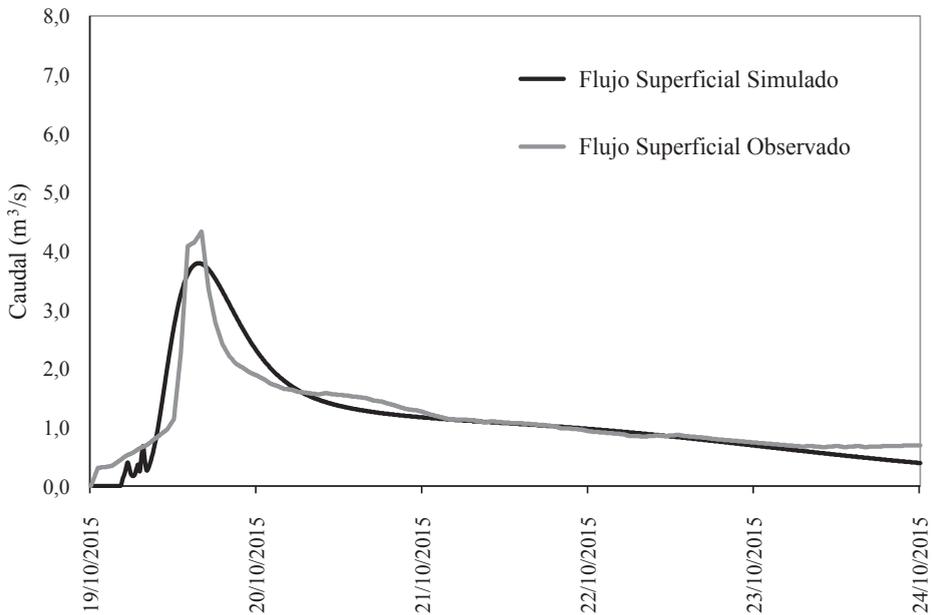


Figura 17. Comparación entre el hidrograma de flujo superficial simulado y HFSO en la Estación Limnigráfica L1 para el evento del 19/10/2015. Fuente: Elaborado por Fernández et al. (2021).

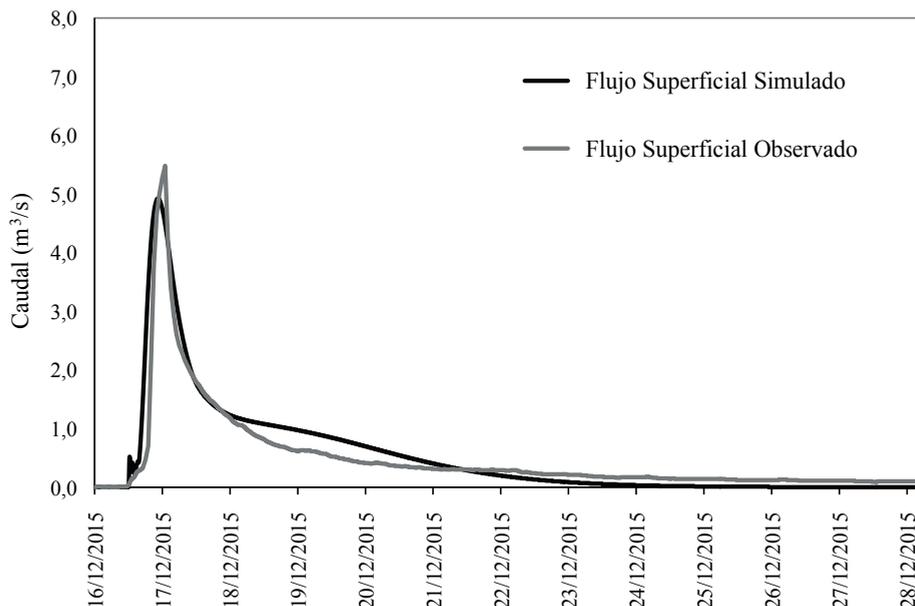


Figura 18. Comparación entre el hidrograma de flujo superficial simulado y HFSO en la Estación Limnigráfica L1 para el evento del 16/12/2015. Fuente: Elaborado por Fernández et al. (2021).

En tabla VI se muestran los valores característicos de caudal en el pico, hora del pico y volumen de escorrentía (en $\text{m}^3 \times 1000$ y mm), correspondientes a los HFSO e Hidrogramas de flujo Superficial Simulados (HFSS) con sus coeficientes de eficiencia de ajuste para las tormentas usadas en la calibración del modelo. El promedio de los errores relativos en valor absoluto (Valor simulado-Valor observado/Valor observado), para los caudales en el pico y los volúmenes de escorrentía, resultan del 10% y 7% respectivamente. La dispersión entre las horas pico simuladas y observadas varía dentro de un intervalo de 240 minutos de atraso a 190 minutos de adelanto. Los valores de eficiencia Nash-Sutcliffe corresponden a ajustes entre muy buenos a excelentes (Tabla IV).

La tabla VII muestra los valores promedio y desvío estándar de los parámetros de ajuste de las once subcuencas consideradas, en base a las cinco tormentas usadas para la calibración. Los valores de tabla VII muestran una importante variabilidad en los coeficientes, lo que es atribuido a variación de la humedad inicial de la cuenca, tanto del suelo como de la cobertura vegetal. Los desvíos estándar de los valores de CN para las diferentes subcuencas presentan valores entre 11 y 17. Sin embargo, los valores promedio no presentan variaciones importantes entre cuencas. Esto marca cierta uniformidad en el comportamiento de las distintas subcuencas del sector superior de la CASG a los fines de la escorrentía producida por lluvias reales.

Tormentas seleccionadas para calibración	Valores Escorrentía Superficial Observados				Valores Escorrentía Superficial Simulados				Eficiencia Nash-Sutcliffe
	Hora del pico	Caudal en el pico (m ³ /s)	Volumen escorrentía (mm)	Volumen escorrentía (*1000 m ³)	Hora del pico	Caudal en el pico (m ³ /s)	Volumen escorrentía (mm)	Volumen escorrentía (*1000 m ³)	
21/9/2015	22/9/2015 06:00	3,09	2,66	526,5	22/9/2015 04:20	3,09	2,63	520,29	0,76
1/10/2015	2/10/2015 03:00	5,83	6,73	1331,77	2/10/2015 06:10	7,01	5,52	1091,79	0,88
14/10/2015	15/10/2015 12:00	5,53	3,62	716,26	15/10/2015 16:00	5,11	3,92	776,39	0,91
19/10/2015	20/10/2015 14:00	4,33	2,53	501,43	20/10/2015 13:35	3,79	2,53	499,66	0,85
16/12/2015	17/12/2015 07:00	5,48	2,63	520,34	17/12/2015 04:30	4,92	2,82	558,53	0,86

Tabla VI. Valores simulados y observados de hora del pico, Caudal del pico y Volumen de escorrentía para las tormentas usadas en la calibración con el correspondiente Coeficiente de eficiencia de ajuste Nash-Sutcliffe. Fuente: elaborado por Fernández et al. (2021) sobre la base de los resultados del programa HEC-HMS.

Subcuencas	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	3	79	3	4	1	16	2	2
Horqueta del Sauce	3	79	3	4	1	13	2	2
Mambaches	4	80	2	4	1	13	1	1
del Abra	3	79	2	4	1	15	1	2
El Atravesado	3	79	2	4	1	14	1	1
del Oro	3	79	2	4	1	14	1	1
SG1	2	77	3	4	0	14	2	2
SG2	3	80	2	4	1	11	2	2
SG3	3	78	3	4	1	13	2	2
SG4	3	76	3	4	1	17	2	2
SG5	3	78	3	4	0	14	2	2

Tabla VII. Valores promedio y desvío estándar de CN, Abstracción Inicial, Almacenamiento Inicial y Máximo Almacenamiento de las tormentas usadas para la calibración para cada subcuenca. Fuente: elaborado por Fernández et al. (2021) sobre la base de los resultados del programa HEC-HMS.

Por lo tanto, los valores presentados en tabla VI explican satisfactoriamente las crecidas reales en base a precipitaciones reales y permiten establecer un rango de valores de los parámetros de ajuste para la cuenca estudiada (Tabla VII).

Resultados de la validación

Los resultados de la validación de las tormentas seleccionadas (30/07 y 07/12 de 2015) se muestran en las figuras 19 y 20.

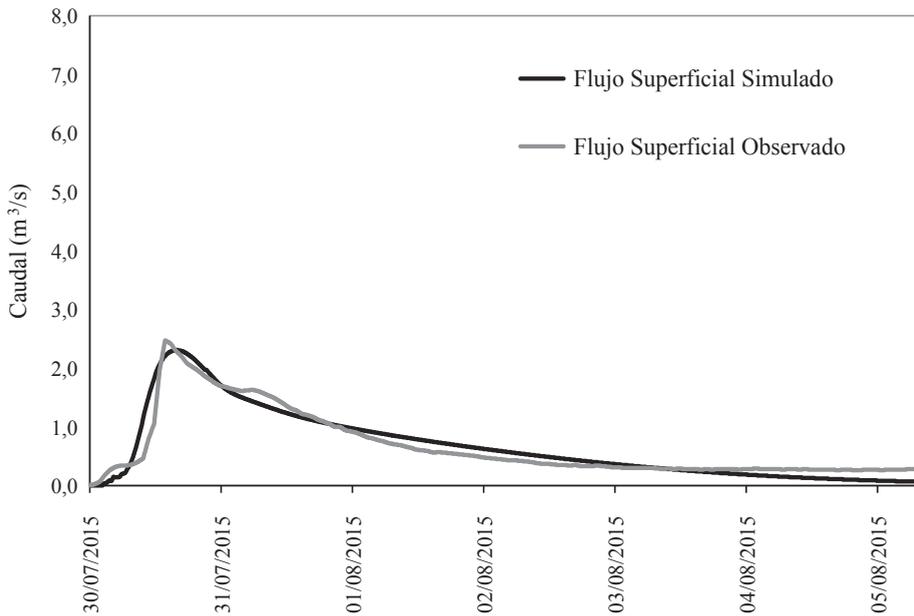


Figura 19. Comparación entre el hidrograma de flujo superficial simulado y HFSO en la Estación Limnigráfica L1 para la tormenta del 30/07/2015.

Fuente: Elaborado por Fernández et al. (2021).

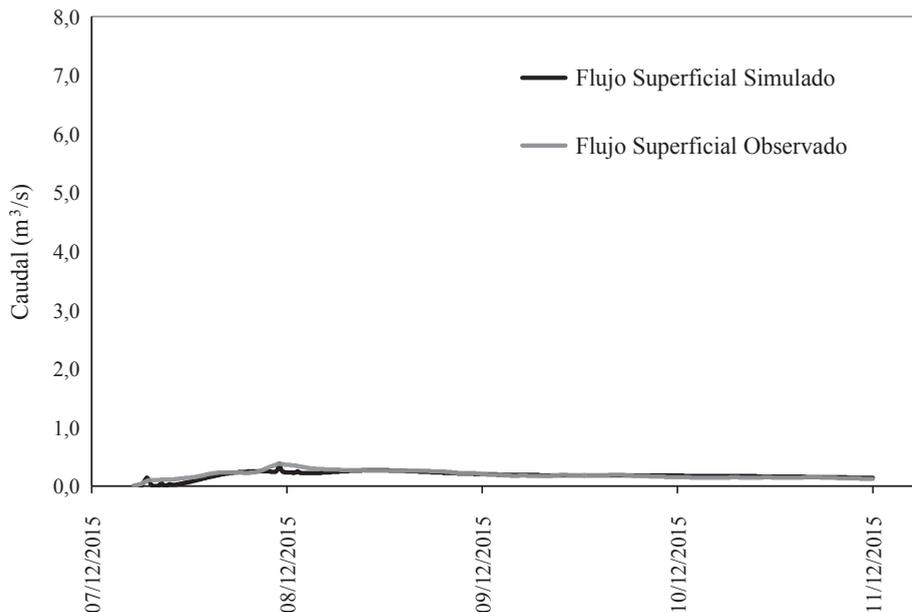


Figura 20. Comparación entre el hidrograma de flujo superficial simulado y HFSO en la Estación Limnigráfica L1 para la tormenta del 07/12/2015.

Fuente: Elaborado por Fernández et al. (2021).

En tabla VIII se muestran los valores característicos de caudal en el pico, hora del pico y volumen de escorrentía (en $\text{m}^3 \times 1000$ y mm), correspondientes a los HFSO e Hidrogramas de flujo Superficial Simulados (HFSS) con el coeficiente de eficiencia de ajuste.

Los valores de eficiencia de ajuste de Nash-Sutcliffe corresponden a ajustes muy buenos según Molnar (2011) (Tabla IV). El promedio de los errores relativos en valor absoluto (Valor simulado-Valor observado/Valor observado), para los caudales en el pico y los volúmenes de escorrentía resultan del 2% y 3% respectivamente. Las horas de pico de la simulación presentan una dispersión menor a 15 minutos.

En consecuencia, las tormentas validadas usando los parámetros de las tormentas calibradas que no varían con la humedad inicial produjeron muy buenos ajustes a los valores observados. Es decir, se ha conseguido validar el modelo para las tormentas estudiadas.

Tormentas seleccionadas para validación	Valores Escorrentía Superficial Observados				Valores Escorrentía Superficial Simulados				Eficiencia Nash-Sutcliffe
	Hora del pico	Caudal en el pico (m ³ /s)	Volumen escorrentía (mm)	Volumen escorrentía (*1000 m ³)	Hora del pico	Caudal en el pico (m ³ /s)	Volumen escorrentía (mm)	Volumen escorrentía (*1000 m ³)	
30/7/2015	31/7/2015 08:00	2,47	1,84	364,43	31/7/2015 08:15	2,35	1,86	368,15	0,86
7/12/2015	8/12/2015 17:00	0,38	0,32	63,25	8/12/2015 17:05	0,38	0,32	63,25	0,67

Tabla VIII. Valores simulados y observados de hora del pico, Caudal del pico y Volumen de escorrentía para las tormentas usadas en la validación con el correspondiente Coeficiente de eficiencia de ajuste NashSutcliffe. Fuente: elaborado por Fernández et al. (2021) sobre la base de los resultados del programa HEC-HMS.

Discusión

El coeficiente de eficiencia de ajuste Nash-Sutcliffe indica que existe una muy buena a excelente correlación entre el escurrimiento superficial modelado y el observado (Tabla IV), tanto para las tormentas calibradas como las validadas. Esto refuerza las conclusiones presentadas anteriormente por Fernández et al. (2019) y, ahora, validadas para dos nuevas tormentas. Por ende, el modelo implementado sobre cuenca en estudio ajusta adecuadamente los hidrogramas medidos.

Los valores presentados en tabla VI para tormentas calibradas explican satisfactoriamente las crecidas reales en base a precipitaciones reales (Figs. 14 a 18) y permiten establecer un rango de valores de los parámetros de ajuste para la cuenca estudiada (Tabla VII).

Los valores medios de los coeficientes de ajuste de las correspondientes once subcuencas (CN, Abstracción inicial, Almacenamiento máximo e inicial) resultan muy similares entre sí, así como sus desvíos estándar (Tabla VII). Esto indica un alto grado uniformidad en el sector superior de la CASG para transformar las precipitaciones en escorrentía.

Las tormentas elegidas para validar la simulación presentaron valores de caudal en el pico, hora del pico y volumen de escorrentía observados muy similares a sus pares simulados (Tabla VIII). Asimismo, las figuras 19 y 20 ilustran los ajustes logrados. El coeficiente de eficiencia de ajuste de Nash-Sutcliffe indica ajustes muy buenos (Tabla IV). Por lo tanto, las tormentas elegidas pudieron ser satisfactoriamente validadas para la cuenca en estudio, en base a tormentas reales.

El promedio de los errores relativos en valor absoluto para los volúmenes de escorrentía resultan menores al 7% para las tormentas calibradas y validadas (Tablas VI y VIII). Este valor de error promedio indica que los volúmenes simulados son una muy buena estimación de la escorrentía en la cuenca, y de esta manera se convierte en una herramienta adecuada para el manejo del agua, en especial para el embalse de Paso de las Piedras que recibe prácticamente la totalidad de la escorrentía de la zona de estudio.

Las tormentas elegidas para validar (Tabla III) tienen precipitaciones muy similares (diferencias menores a 1,2 mm en cada estación meteorológica). Sin embargo el valor del caudal pico es 4,6 veces mayor para el 30/07 respecto de la del 07/12. Esta notoria diferencia se puede deber a una influencia estacional, proximidad temporal de lluvias anteriores y/o usos del suelo, entre otras variables. Es necesario simular más tormentas para establecer posibles rangos de los parámetros de ajuste en función de las variables mencionadas.

El modelo hidrológico calibrado y ahora validado permite determinar los hidrogramas de cierre de cada subcuenca en particular y conocer cómo se combinan para formar el hidrograma final. Esto resulta una herramienta útil a la hora de adoptar caudales de diseño, volúmenes de escorrentía y tiempo de crecida de las diversas subcuencas que conforman el área de estudio. Entre las utilidades se pueden mencionar: caudales de diseño para calcular pequeñas presas para consumo de agua y/o recreación, reservorios para atacar incendios de verano, defensas, controles de crecida, alcantarillas, volúmenes de agua para gestionar su manejo sustentable, caudales y volúmenes que son base para simulaciones con escenarios de cambio climático, estudios de transporte de sedimentos y erosión, estudios de contaminación, etcétera.

Conclusiones

El modelo hidrológico del sector superior de la CASG desarrollado a partir de la implementación del HEC-HMS se muestra como una excelente herramienta para simular el comportamiento hidrológico de la cuenca para tormentas reales. Prueba de ello resulta los altos valores del coeficiente de eficiencia de ajuste Nash-Sutcliffe, tanto para las tormentas calibradas como las validadas.

Cinco tormentas fueron calibradas y los valores de caudal en el pico, volumen de escorrentía y hora en que se produce el pico fueron representados satisfactoriamente por las simulaciones. Dos tormentas fueron usadas para los fines de la validación, obteniéndose resultados igualmente satisfactorios.

Se presentan valores promedio, de CN, Abstracción Inicial (mm), Almacenamiento inicial (%), Máximo almacenamiento (mm) para cada una de la subcuencas correspondientes a las tormentas calibradas. Los mismos representan un marco de variación que explica el comportamiento hidrológico de la relación lluvia-escorrentía de la zona de estudio. Además, los valores de los parámetros calibrados mencionados presentan muy poca variación entre subcuencas, lo que sugiere un alto grado de uniformidad del sector superior de la CASG en cuanto a la escorrentía generada.

La validación del modelo produjo excelentes resultados, por lo que se considera que el objetivo del trabajo fue alcanzado. Pero es necesario contar con más datos de campo. Por un lado, para ampliar su calibración para tormentas de alta recurrencia y por otro para determinar la influencia de los antecedentes de humedad de la cuenca, tipo y uso de suelo en la escorrentía final.

Referencias

Aduriz, M. A., Gargano, A. O., Chimeno, P., Saldungaray, M. C. & Conti, V. P. (2003). Caracterización de los agrosistemas predominantes de la cuenca alta del

Río Sauce Grande. *RIA, Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 32(3), 3-25.

Chow, V. T., Maidment, D. R. & Mays, L. W. (1994). *Hidrología Aplicada*. Bogotá: Editorial McGraw Hill Interamericana, 584 p.

Espósito, M. (2014). *Hidrología e hidroquímica de la cuenca del arroyo El Divisorio, provincia de Buenos Aires*. (Tesis doctoral inédita). Universidad Nacional del Sur, Departamento de Geografía y Turismo, Bahía Blanca.

Fernández, S., Pérez, D., Brandizi, L., Serralunga, M., Weis, C. & 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.

Gil, V. (2009). *Hidrogeomorfología de la cuenca alta del río Sauce Grande aplicada al peligro de crecidas*. Tesis Doctoral. Recuperada de la Universidad Nacional del Sur-Biblioteca Central: <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: Surata's river and Oro's river (Santander, Colombia). *DYNA*, 83(196), 213-222.

Hydrologic Engineering Center (2000). *Hydrologic Modeling System HEC-HMS. Technical 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.

Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INDEC) (2001). *Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas*. Argentina: INDEC.

Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INDEC) (2010). *Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas*. Argentina: INDEC.

Linsley, R. K., Kohler, M. A. & Paulus, J. L. H. (1986). *Hidrología para Ingenieros* (segunda edición). México: Mc Graw-Hill.

Molnar, P. (2011). *Calibration. Watershed Modelling, SS 2011*. Zürich: Institute of Environmental Engineering. ETH Zürich.

Nash, J. E. & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models: Part I. A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282-290.

Fecha de Recepción: 24 de enero de 2020

Fecha de Aceptación: 18 de noviembre de 2020

© 2021 por los autores; licencia otorgada a la Revista Universitaria de Geografía. Este artículo es de acceso abierto y distribuido bajo los términos y condiciones de una licencia Atribución-NoComercial 2.5 Argentina de Creative Commons. Para ver una copia de esta licencia, visite http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.5/ar/deed.es_AR