



---

## EJE TEMÁTICO HIDROLOGÍA E HIDRÁULICA

---

### CALIBRACIÓN DE MODELOS HIDROLOGICOS EN CUENCAS DE LLANURAS: CASO RÍO SALADILLO, ARGENTINA

**Eder, Matías<sup>1</sup>; Guillén, Nicolás Federico<sup>1,2</sup>; Bertoni, Juan Carlos<sup>1</sup>; Rodríguez, Andrés<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>CETA. Centro de Estudios y Tecnología del Agua - Universidad Nacional de Córdoba - Laboratorio de Hidráulica, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales., Universidad Nacional de Córdoba, Av. Filloy s/n, Ciudad Universitaria, Córdoba, Argentina

<sup>2</sup> Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina

E-mail: nfguillen@hotmail.com

**Palabras clave:** Modelos Hidrológicos, Calibración, Cuencas de llanuras

#### RESUMEN

Los modelos hidrológicos son utilizados en la actualidad para diferentes usos. Una de sus principales aplicaciones consiste en predecir (en forma cuantitativa) los escurrimientos superficiales que pueden ocurrir en una determinada cuenca, asociados a precipitaciones de recurrencias conocidas. Lo cual permite asociar eventos de crecidas e inundaciones a periodos de recurrencia, y brinda a los tomadores de decisiones una herramienta para asignar recursos en forma eficiente a las obras involucradas en los sistemas de drenaje, definir zonas de riesgo y planes de contingencia ante eventos extremos que superen la capacidad de la red de drenaje.

Si se buscan resultados fiables, la calibración y la validación de modelos y parámetros hidrológicos resultan fundamentales para la aplicación de este tipo de modelos. En este trabajo se presenta una metodología de calibración de un modelo hidrológico basado en información de precipitaciones y de series históricas de caudales correspondientes a los mismos periodos de tiempo. La calibración de parámetros hidrológicos en el modelo consiste en ajustar, por un lado, parámetros asociados a los procesos de infiltración (abstracciones) y, por otro, a los procesos de transformación lluvia caudal. El caso en estudio corresponde al río Saladillo en la provincia de Santa Fe, Argentina, cuya cuenca de aporte se encuentra en llanura.

#### INTRODUCCIÓN

La hidrología clásica se ha desarrollado bajo el concepto de cuenca hidrográfica convencional, donde se puede definir un área de aporte y el comportamiento de cada punto de la misma. Además existe una organización de la red de drenaje y puede identificarse cada componente de la red con un orden de jerarquía. Estos sistemas son denominados Sistemas Hidrológicos Típicos (SHT).

En llanuras de muy baja pendiente no puede definirse una red de drenaje lineal o una superficie tributaria, manifestándose transferencia en sus divisorias, con pluralidad de puntos de salida en algunos casos, y dada la insuficiente pendiente las respuestas a los estímulos pluviales se dan en términos de acumulación. Son denominados Sistemas Hidrológicos No Típicos (SHNT) (Caamaño Nelli et al 1979).

En los SHNT predominan los procesos hidrológicos verticales (precipitación, almacenamiento, evapotranspiración, infiltración y percolación). Estos sistemas se caracterizan por poseer sectores con divisorias de aguas superficiales difusas, en donde la generación del escurrimiento superficial se produce más o menos lentamente, a partir de umbrales de acumulación. En este contexto podemos mencionar que el relieve de la cuenca del Plata, una de las más extensas del mundo (3100000 Km<sup>2</sup>) que abarca gran parte del Brasil, el suroeste de Bolivia, gran parte de Uruguay, la totalidad de Paraguay y gran parte del norte, la mesopotamia y la pampa húmeda de Argentina; se caracteriza por el claro predominio de llanuras (Figura 1).

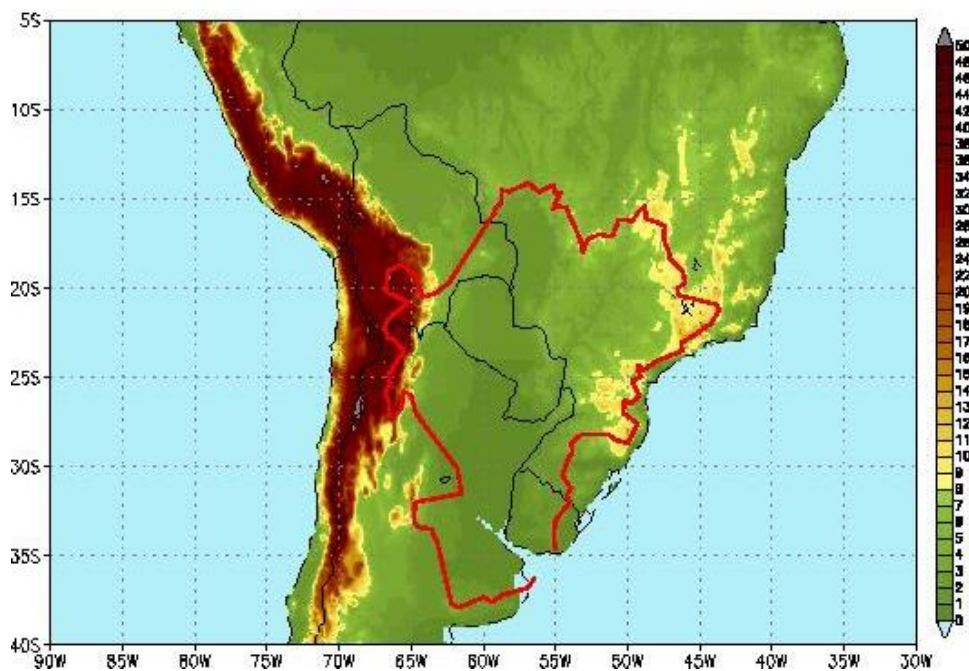


Figura 1.- Cuenca del Plata.

Dada la relevancia del microrelieve, los SHNT se caracterizan por presentar, en términos hidrológicos, menor capacidad para absorber cambios producidos por el hombre.



En la provincia de Santa Fe (Argentina) la ejecución de canales ha implicado un aumento sistemático de la densidad de cursos capaces de drenar áreas rurales y urbanas. Bertoni et al. (1998) estimaron que en las regiones centro y norte de dicha provincia, la longitud de canales artificiales constituía alrededor del 42 % de la longitud de la red de drenaje existente en las regiones mencionadas. Este porcentaje se incrementó progresivamente hasta los últimos años. La relevancia de estas acciones deriva en que desde el punto de vista hidrológico (dependiendo del incremento artificial de la capacidad de drenaje superficial), los SHNT pueden llegar a responder como un SHT, especialmente durante la ocurrencia de eventos de humedad y pluviosidad extremas.

El presente trabajo se orienta a caracterizar el comportamiento hidrológico de un SHNT con vistas a definir las respuestas más probables asociadas a situaciones de extremos húmedos (caudales máximos, tiempos de respuesta, etc.), revistiendo esta aplicación gran interés para la Hidrología Práctica asociada al proyecto de obras de infraestructura (caudales de proyecto asociados a diferentes recurrencias)

En el presente trabajo se analiza una cuenca correspondiente al río Saladillo, ubicada en la provincia de Santa Fe, Argentina (Figura 2). En ella se ilustran las dos zonas en que fue dividida la cuenca (A y B respectivamente). Esta cuenca, de 3127 Km<sup>2</sup> de superficie, fue seleccionada por contar con suficiente información de campo (tanto de lluvia como de caudales) el punto de cierre de la misma coincide con la estación de aforo "Saladillo Dulce – Ruta Prov. N°81" en la cual se realizan mediciones diarias de caudal. Además la cuenca cuenta con una estación pluviométrica "Cacique Ariacaiquín", ubicada dentro de la misma, la cual se consideró representativa de la precipitación sobre la Subcuenca A y una segunda estación pluviométrica "Malabrigo – Ruta Prov. N° 88S" próxima a la cuenca, la cual fue empleada para definir la precipitación sobre la Subcuenca B.

Esta cuenca constituye un SHNT que se asemeja a un plano suavemente inclinado, con pendientes regionales variables entre 0.01% y 0.05%.

Con el objeto de inferir las características hidrológicas de la cuenca, para eventos de diferente magnitud, se realizó en primera instancia un análisis de los datos de campo obtenidos. Para ello se realizó un balance de masa entre los volúmenes precipitados y los volúmenes escurridos para diferentes eventos históricos; posteriormente se implementaron modelos matemáticos de simulación y se calibraron sus parámetros hidrológicos.

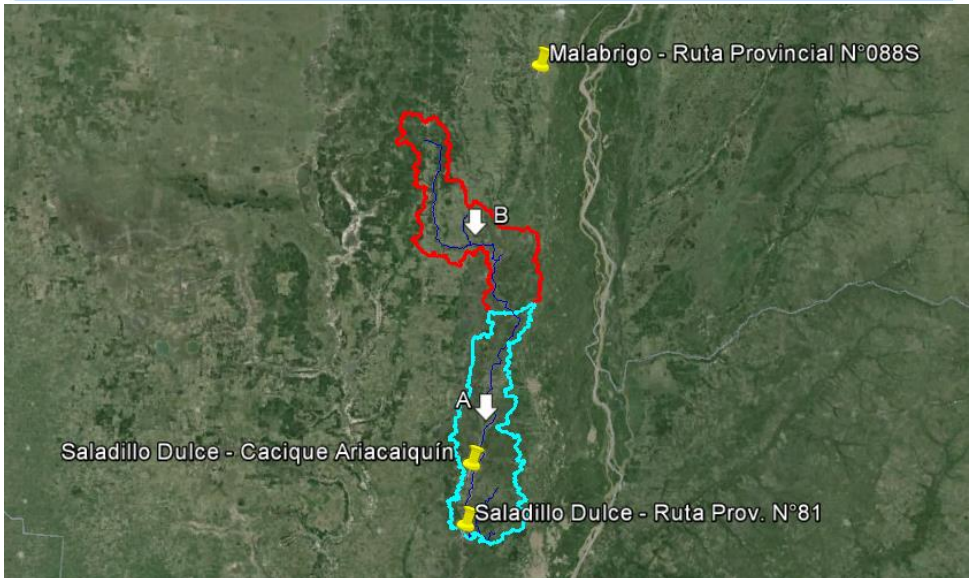


Figura 2.- Cuenca analizada con estaciones de medición de caudales y precipitación (Santa Fe, Argentina).

## OBJETIVOS

El objetivo general de este trabajo consistió en analizar el comportamiento hidrológico de la cuenca de aporte al punto de aforo “Saladillo Dulce – Ruta Prov. N° 81” para eventos extremos húmedos de diferentes recurrencias.

Para alcanzar este objetivo general se plantearon los siguientes objetivos específicos:

- ❖ Realizar un análisis de frecuencias de la serie histórica de caudales para asignar recurrencias a los caudales picos observados en cada año hidrológico.
- ❖ Analizar eventos hidrológicos históricos de diferentes magnitudes, a través de un balance de masa, a partir de datos de precipitación y escurrimientos medidos en la cuenca.
- ❖ Simular, mediante un modelo matemático de cada uno de los eventos históricos disponibles y mediante un proceso de calibración determinar los valores de los parámetros hidrológicos para cada uno de ellos.

## DATOS UTILIZADOS

Fueron utilizados datos hidrológicos de precipitación y caudales medidos en la cuenca en estudio. Los mismos fueron extraídos de la base de datos de la “Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación” (Argentina).

- Las estaciones pluviométricas analizadas fueron (ver ubicación en Figura 2):

Cacique Ariacaquíñ: Serie de precipitaciones diarias entre el 01/01/1981 hasta el 30/04/2015.

Malabrigo – Ruta Prov. N° 88S: Serie de precipitaciones diarias entre el 01/11/1982 hasta el 30/04/2015.

➤ La estación de aforo de caudales utilizada fue:

Saladillo Dulce – Ruta Prov. N°81: La serie de caudales cuenta con 24 años de datos útiles medidos entre los años 1957 y 2013. En la Figura 3 se presenta la serie histórica de caudales máximos anuales.

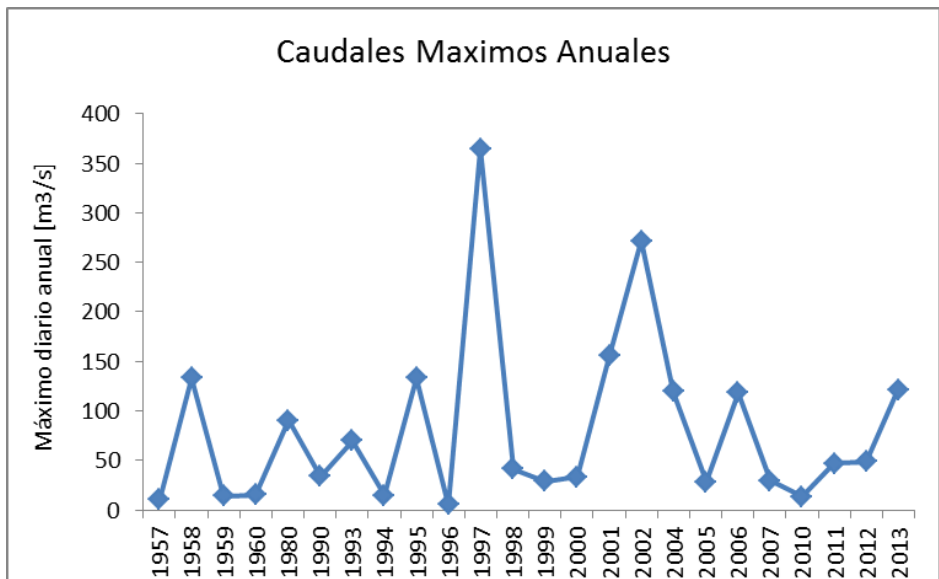


Figura 3.- Serie histórica de caudales máximos anuales registrados en la estación de aforo "Saladillo Dulce – Ruta Prov. N° 81".

## MATERIALES Y MÉTODOS

A continuación se presenta la metodología utilizada para realizar el análisis de frecuencias a la serie de máximos caudales anuales y asignar a través de una función de distribución de probabilidades (FDP) recurrencias a diferentes caudales.

Posteriormente se presentan 6 eventos hidrológicos históricos registrados en la cuenca y utilizados en este trabajo para analizar la respuesta de la cuenca. El análisis básico de estos eventos consistió en realizar un balance de masa entre las precipitaciones y los escurrimientos superficiales registrados.

Finalmente se presenta el software utilizado para realizar las modelaciones numéricas de los eventos registrados y la calibración de los parámetros hidrológicos.

### **Análisis de frecuencia**

Para asignar un valor de recurrencia a cada uno de los caudales observados se realizó un análisis de frecuencia de los caudales máximos anuales medidos en la estación "Saladillo Dulce – Ruta Prov. N° 81" y presentados en la Figura 3.

La metodología con la cual se analizaron las series de caudales es la siguiente:

1-Se realizaron sobre las series las diferentes pruebas estadísticas (detección de presencia de datos atípicos, independencia, homogeneidad y estacionalidad).

2-Se calcularon los datos estadísticos más importantes de la serie de máximos anuales: Valor máximo observado en la serie, promedio aritmético y desvío estándar.

3-Se determinaron las probabilidades empíricas de cada dato máximo anual observado, utilizando la Ecuación de Weibull.

4-Luego se ajustaron las siguientes 6 funciones de distribución de probabilidad (FDP) teóricas:

- GEV (Método de Máxima Verosimilitud).
- Gumbel (Método de Máxima Verosimilitud).
- LogNormal (Método de Máxima Verosimilitud).
- GEV (Método de Momentos).
- Gumbel (Método de Momentos).
- Log Pearson tipo III (Método de Momentos).

5-Sobre cada uno de los ajustes a las diferentes funciones de distribución de probabilidad utilizadas se realizó la prueba de adecuación de Chi Cuadrado para determinar cuál es la que mejor ajusta.

Finalmente, se aplicó la FDP de mejor ajuste para estimar los caudales correspondientes a diferentes recurrencias.

### **Eventos registrados**

Antes de realizar el análisis de los datos de campo, se definió la cuenca de aporte al punto de aforo a partir de imágenes satelitales y al modelo digital de elevación SRTM. Posteriormente con base a la información pluviométrica y en la red de drenaje, se dividió a la cuenca de aporte en dos subcuencas (A y B). En la Tabla 1 se presenta el área de cada una de las subcuencas.

**Tabla 1.-** Área de la cuenca de aporte y sus respectivas subcuencas.

Subcuenca	Área
	Km <sup>2</sup>
A	1603
B	1524
<b>Total</b>	<b>3127</b>





Para analizar el comportamiento de la cuenca ante eventos de diferentes magnitudes se definieron escenarios de caudales “altos, medios y bajos”, según la descripción siguiente:

**Escenarios de Caudales Altos:** Se analizaron 2 eventos cuyo caudal medido fue mayor a 200 m<sup>3</sup>/s:

**Evento del año 1998** – Se registró un caudal pico de 365 m<sup>3</sup>/s entre los días 18 y 19 de enero del 1998, producto de una serie de precipitaciones ocurridas entre el 30 de diciembre de 1997 y el 14 de enero del año 1998.

**Evento del año 2003** – Se observaron mediciones de caudal de 272 m<sup>3</sup>/s entre el 26 y 27 de abril del 2003, como consecuencia de precipitaciones registradas entre el 17 y 25 de abril de ese mismo año.

**Escenarios de Caudales Medios:** Se analizaron dos eventos hidrológicos con caudales próximos a 150 m<sup>3</sup>/s:

**Evento del año 2002** – El 25 de abril del año 2002 se registró un caudal de 155 m<sup>3</sup>/s en respuesta a una serie de precipitaciones ocurridas entre el 4 y el 24 de abril del mismo año.

**Evento del año 2005** – Se registró un caudal de 120 m<sup>3</sup>/s el 18 de marzo del 2005 debido a precipitaciones registradas entre el 8 y 13 de marzo.

**Escenarios de Caudales Bajos:** Se analizaron dos eventos de caudales bajos cuyos picos no superaron 50 m<sup>3</sup>/s.

**Evento del año 2001** – Se registró un caudal pico de 33 m<sup>3</sup>/s el 26 de febrero en respuesta a una precipitación registrada entre el 23 y 24 de febrero del mismo año sobre la subcuenca A.

**Evento del año 2011** – El 28 de octubre se observó un caudal de 47 m<sup>3</sup>/s como consecuencia de una serie de precipitaciones ocurridas entre el 19 y el 25 de octubre del 2011.

### **Análisis de los Eventos registrados**

Para caracterizar la respuesta hidrológica de la cuenca, ante los eventos presentados, se realizó un análisis de las series de precipitaciones y caudales. Este análisis consistió en un balance entre el volumen de agua precipitado en la cuenca y el volumen total escurrido. La relación entre el volumen escurrido y el volumen precipitado se define como el coeficiente de “run off” (C). Para este trabajo se decidió caracterizar la respuesta de la cuenca mediante la inversa de este coeficiente, es decir:

$$\frac{1}{C} = \frac{V_p}{V_e} = \frac{\text{Volumen total precipitado}}{\text{Volumen total escurrido}}$$

Donde,

$$V_p = \sum \text{Lamina precipitada total}_i \times \text{Area de la Subcuenca}_i$$

$$V_e = \bar{Q} \times \text{tiempo}$$



Entonces, para una misma precipitación en la cuenca, a medida que el valor de la relación  $V_p/V_e$  disminuye, los volúmenes escurridos aumentan y por lo tanto los caudales. Es decir que para valores altos de  $V_p/V_e$  adquieren mayor relevancia los procesos hidrológicos de pérdidas como el almacenamiento superficial, la evapotranspiración, la infiltración y la percolación; y a medida que esta relación se aproxima a la unidad los volúmenes escurridos son mayores.

Para cada uno de los eventos de caudales altos, medios y bajos se determinó el valor de esta relación ( $V_p/V_e$ ) para dos periodos diferentes de análisis, a saber:

- **141 días:** con el caudal máximo al centro de dicho periodo de interés.
- **30 días:** con el caudal máximo y las precipitaciones que lo originaron dentro de ese intervalo.

El periodo de 141 días tiene como objetivo analizar la relación que existe entre los volúmenes precipitados y escurridos en todo el periodo de lluvias anuales. El análisis se inicia con caudales de estiaje contemplando el crecimiento de los mismos y la rama descendente del hidrograma anual.

El periodo de 30 días tiene como finalidad contempla las precipitaciones que dieron origen al pico del hidrograma y a la rama descendente del mismo.

El objeto de realizar este análisis para 30 y 141 días es determinar si el comportamiento de la cuenca, ante eventos extremos, depende de las precipitaciones totales acumuladas en periodos extendidos.

### **Modelo HEC HMS**

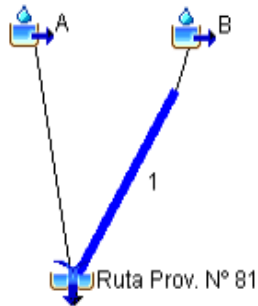
Para realizar las modelaciones numéricas se utilizó el programa de cálculo HEC-HMS (modelo creado por el Hydrologic Engineering Center del U.S. Army Corps of Engineers). Este programa incluye varios modelos de transformación lluvia-caudal, tales como: hidrograma unitario del SCS, hidrograma unitario de Clark, y procesos de tránsito mediante modelo de almacenamiento, de onda cinemática, etc.

A efectos de simular las pérdidas en la precipitación, el modelo también permite utilizar diferentes métodos como el método de Pérdida Constante, el método de Green and Ampt, el método del SCS Curve Number, etc.

Este modelo permite además realizar la calibración de parámetros hidrológicos para ajustar los caudales modelados a una serie de caudales observados.

En la Figura 4 se presenta el esquema utilizado para realizar las modelaciones hidrológicas.





**Figura 4.-** Esquema del modelo numérico utilizado para modelar los eventos históricos en “Saladillo Dulce – Ruta Prov. N° 81”.

Para realizar todas las modelaciones se utilizó para ambas subcuencas (A y B) el hidrograma unitario de Clark y para las pérdidas el método del U.S. Soil Conservation Service (U.S. Natural Resources Conservation Service, 2001). Para modelar el tránsito “1” se aplicó el método de Muskingum tradicional.

En base a los métodos de pérdidas y de transformación lluvia-escorrentía utilizados se calibraron para cada subcuenca los siguientes parámetros:

- CN – SCS Curve Number
- Ia – SCS Curve Number – Initial Abstraction
- K – Clark Unit Hydrograph – Storage Coefficient
- Tc – Clark Unit Hydrograph – Time of Concentration

Y para el tránsito se calibraron los parámetros X y K de Muskingum

La calibración de estos parámetros se llevó a cabo utilizando el método de Gradiente Univariado y como función objetivo el método de Pico Ponderado por la Raíz Cuadrada del Error Medio (Feldman, 2000).

## RESULTADOS

### Análisis de frecuencias

Al realizar el análisis de frecuencia a la serie de la estación de aforo “Saladillo Dulce – Ruta Prov. N° 81”, esta superó las diferentes pruebas estadísticas; la FDP que mejor describió la muestra fue la Lognormal por el método de Máxima Verosimilitud. La relación entre caudales máximos diarios y el tiempo de retorno se presentan en la Figura 5 y en la Tabla 2.

Para definir los intervalos de confianza se obtiene el valor del desvío  $\sigma$ , aplicando estadística inferencial y considerando una distribución normal se define el intervalo de confianza con un 95% como el rango de valores comprendido entre  $\bar{X} - 2\sigma$  y  $\bar{X} + 2\sigma$ .

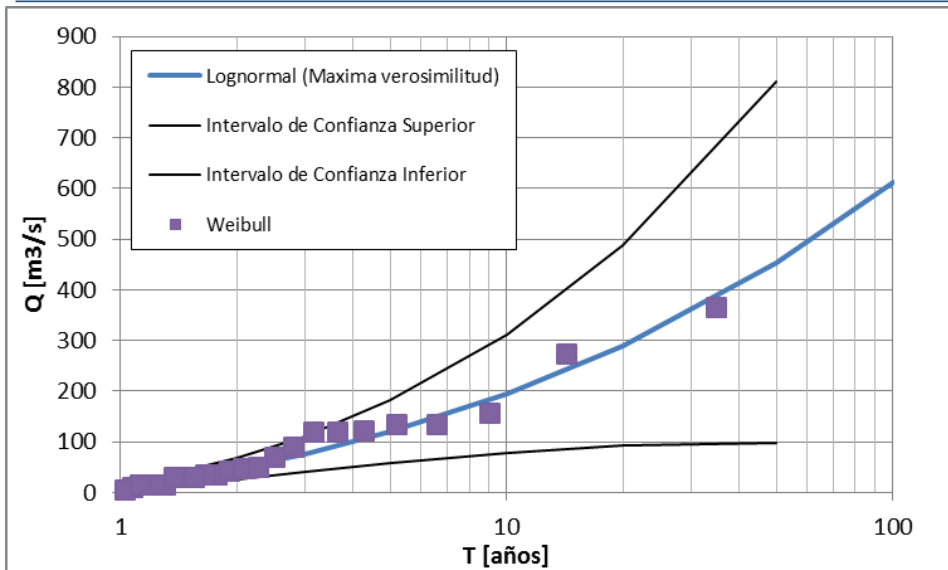


Figura 5.- Relación entre  $Q_{pico}$  y  $T_r$  en la estación de aforo de caudales.

Tabla 2.- Caudal pico estimado para diferentes recurrencias.

Caudal Pico $m^3/s$	Periodo de Recurrencia Años
454	50
290	20
194	10
120	5
76	3
48	2

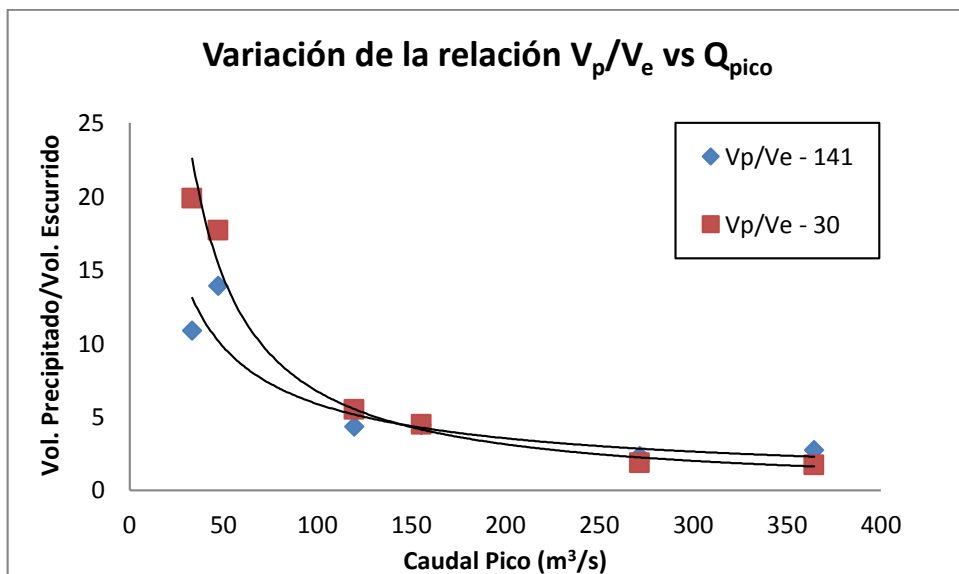
### Análisis de los Eventos registrados

Aplicando la metodología descrita anteriormente se determinó el valor de la relación entre el volumen precipitado y el escurrido ( $V_p/V_e$ ) para los 6 eventos registrados, para un periodo de 141 días y otro de 30 días.

En la Tabla 3 se presenta para cada uno de los eventos el caudal pico observado, la lámina media de lluvia precipitada en la cuenca (para lo cual se aplicó un promedio ponderado con el área de las subcuencas de las series de precipitaciones) y la relación  $V_p/V_e$  para cada uno de los periodos analizados.

**Tabla 3.-** Evento hidrológico registrado, precipitación y relación  $V_p/V_e$  para 141 y 30 días.

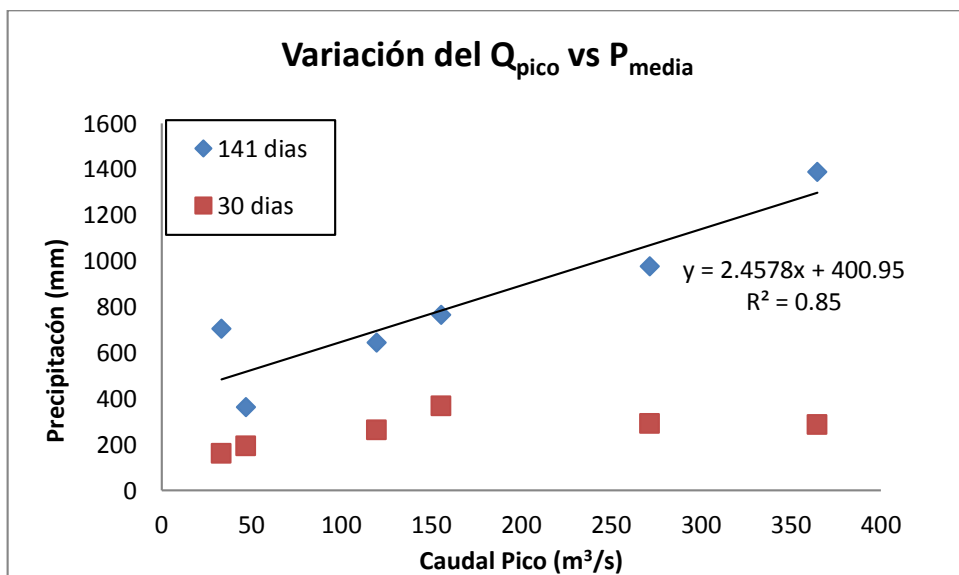
Evento de Caudales	Año	Q <sub>pico</sub> m <sup>3</sup> /s	141 días		30 días	
			P Media mm	V <sub>p</sub> /V <sub>e</sub>	P Media mm	V <sub>p</sub> /V <sub>e</sub>
Alto	1998	365	1389	<b>2.73</b>	285	<b>1.74</b>
Alto	2003	272	978	<b>2.34</b>	290	<b>1.88</b>
Medio	2002	156	766	<b>4.44</b>	367	<b>4.48</b>
Medio	2005	120	643	<b>4.36</b>	263	<b>5.52</b>
Bajo	2011	47	364	<b>13.93</b>	192	<b>17.73</b>
Bajo	2001	33	704	<b>10.90</b>	160	<b>19.91</b>



**Figura 6.-** Variación de la relación  $V_p/V_e$  con el  $Q_{pico}$ .

En la Figura 6 se puede observar la relación que existe entre el caudal pico ( $Q_{pico}$ ) y  $V_p/V_e$ . Se puede observar que a medida que el caudal pico crece la relación  $V_p/V_e$  tiende asintóticamente a la unidad. Si bien esta tendencia se mantiene en todo el rango de caudales analizados, el mayor cambio en la respuesta de la cuenca se presenta para un caudal de entre 75 - 100  $m^3/s$  correspondientes a una recurrencia de aproximadamente 3 a 5 años. A partir de estos caudales no se observan diferencias importantes en el comportamiento de la cuenca para un periodo de 30 o 141 días.

En la Figura 7 se graficó la relación entre el caudal pico ( $Q_{pico}$ ) y la precipitación media areal acumulada correspondiente a los períodos de 141 y 30 días respectivamente. Se puede observar que en el caso analizado de 141 días, a medida que la precipitación acumulada aumenta el caudal observado también lo hace con una relación lineal cuya ordenada al origen es aproximadamente 400 mm, es decir que la precipitación acumulada antes de un evento de precipitación debe superar los 400 mm para que se observen incrementos significativos del caudal escurrido. Este comportamiento es compatible con las características hidrológicas de un SHNT, donde los procesos de acumulación previos a la ocurrencia de una lluvia son determinantes en la definición del caudal de respuesta al sistema.



**Figura 7.-** Relación entre  $Q_{pico}$  y lámina precipitada en la cuenca para un período de 30 y 141 días.



Por otro lado se observa que la precipitación acumulada durante 30 días presentó valores similares para los eventos analizados de caudales medios y altos y que los mismos no mantienen una tendencia creciente a medida que el caudal pico aumenta.

Se observa que para precipitaciones similares, ocurridas entre 20 y 30 días antes del evento, el caudal pico ( $Q_{\text{pico}}$ ) observado varían entre 120 y 360  $\text{m}^3/\text{s}$ , esto indica que la cuenca puede responder de manera muy distinta ante eventos similares. Por otro lado, en la misma figura se puede observar que la respuesta de la cuenca varía en forma proporcional con las precipitaciones totales acumuladas en periodos extendidos (entre 100 y 141 días).

Esto demuestra que, como ya fuera citado, ante la ocurrencia de un evento de lluvia la magnitud de los caudales máximos quedan definidos fundamentalmente por el estado de humedad antecedente de la cuenca, jugando la magnitud de la precipitación del evento analizado un rol relativamente menor. En síntesis, en los SHNT las condiciones de humedad antecedente y de eventual saturación de la cuenca son determinantes en relación a la magnitud de la respuesta hidrológica del sistema.

De este análisis se desprende que en este SHNT analizado, para años hidrológicos húmedos cuya precipitación acumulada en un período de aproximado de 70 días previos a los eventos de precipitación supere el umbral de 400 - 600 mm, puede adoptarse un funcionamiento similar a los SHT. A una conclusión similar arribaron Bacchiega, Bertoni y Maza (2004) al analizar el comportamiento de la cuenca del río Salado santafesino (55.000  $\text{km}^2$ ) en oportunidad de producirse la catastrófica inundación de la ciudad de Santa Fe (Argentina). Durante el período que antecedió a dicha inundación la cuenca mencionada estuvo sometida a procesos de precipitación prolongados que derivaron en un estado de humedad antecedente próximo al de saturación, resultando el comportamiento hidrológico de dicho SHNT tal como el de un SHT, siendo explicable mediante las técnicas tradicionales de transformación lluvia-caudal.

### **Modelo de los Eventos Registrados con HEC HMS**

A partir de los datos de precipitaciones obtenidos de las series pluviométricas, las características de las subcuencas y de los caudales observados, se realizó la modelación hidrológica de los eventos correspondientes a los años 1998, 2002, 2005, 2011 y 2001 para un periodo de 30 días, calibrándose a su vez los parámetros hidrológicos de las subcuencas y los procesos de tránsito correspondientes.

Vale aclarar que no se pudo realizar la calibración de los parámetros de la cuenca para el evento correspondiente al año 2003 debido a falta de datos de caudal.

Para modelar la transformación lluvia-escorrentía se utilizó el hidrograma unitario de Clark, para las pérdidas se aplicó el método del SCS Curve Number (Soil Conservation Service) y para el tránsito de la subcuenca "B" el método de Muskingum. La calibración de los parámetros se llevó a cabo utilizando el método de Gradiente Univariado y como función objetivo el método de Pico Ponderado por la Raíz Cuadrada del Error Medio.

Desde la Figura 8 hasta la Figura 12 se presentan gráficos comparativos entre el hidrograma observado (línea negra) y el obtenido con el modelo HEC-HMS calibrado (línea azul).

Como se puede observar en los gráficos el ajuste entre hidrogramas observados y simulados resultó adecuado, tanto en lo que respecta al caudal pico, como a la forma de los hidrogramas. La relevancia del resultado está en el hecho que las crecidas analizadas difirieron entre si tanto en las características de las ramas ascendente y descendente de los hidrogramas observados.

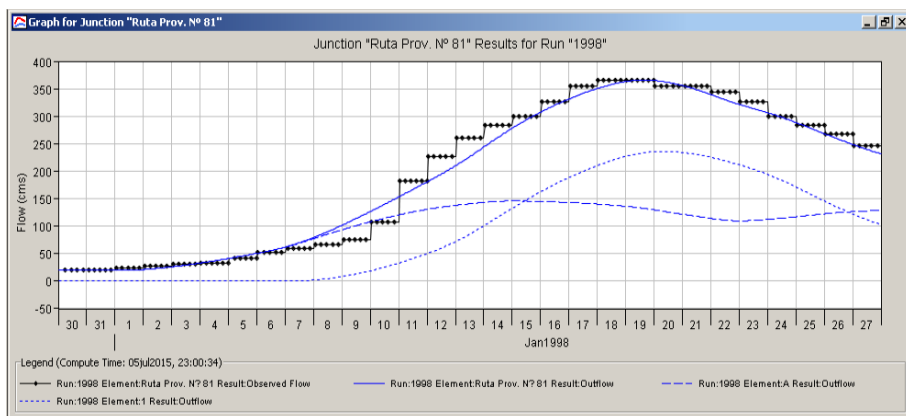


Figura 8.- Comparación entre el evento del año 1998 observado y modelado.

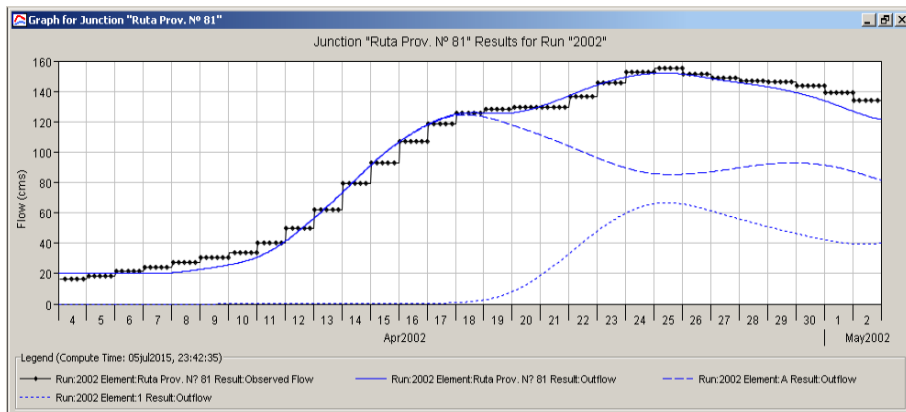


Figura 9.- Comparación entre el evento del año 2002 observado y modelado.



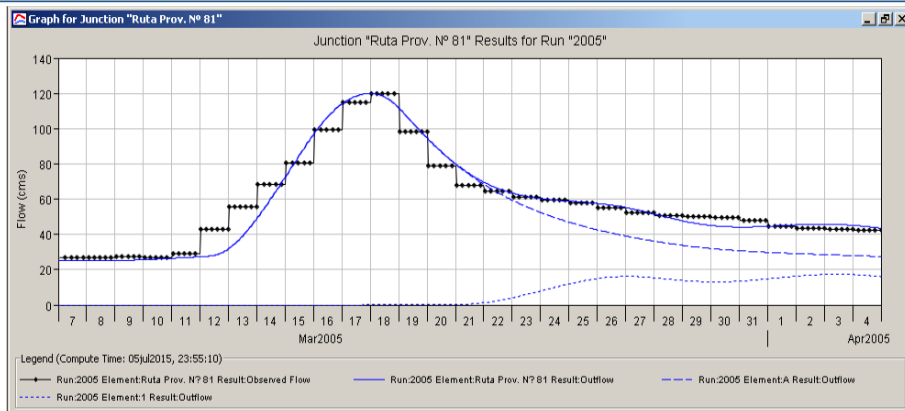


Figura 10.- Comparación entre el evento del año 2005 observado y modelado.

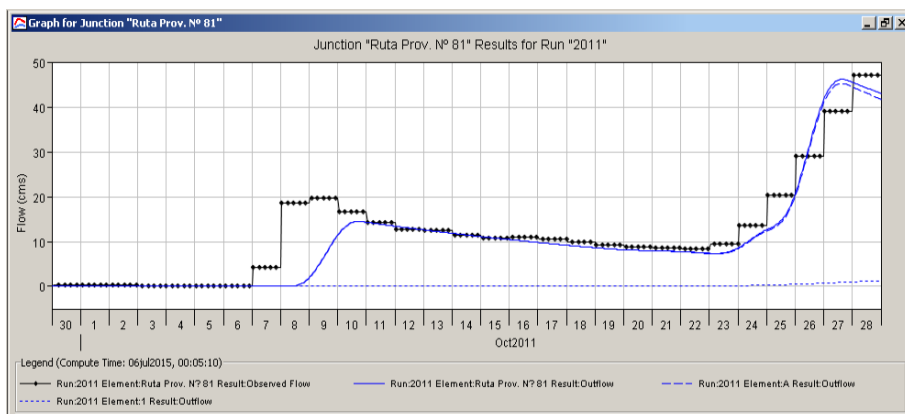


Figura 11.- Comparación entre el evento del año 2011 observado y modelado.

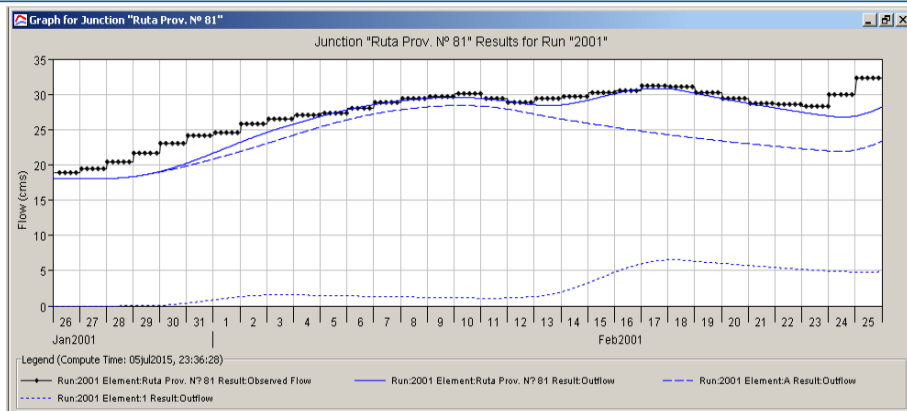


Figura 12.- Comparación entre el evento del año 2001 observado y modelado.

### Parámetros Calibrados

En la Tabla 4 se presentan los valores de los parámetros hidrológicos calibrados para los diferentes eventos y posteriormente se presenta un análisis de la variación de cada uno de ellos según el escenario modelado.

Tabla 4.- Parámetros del modelo hidrológico calibrado.

Evento de Caudal	Año	Q <sub>pico</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Parámetros Calibrados								
			T <sub>c</sub> (hs)		K de Clark (hs)		CN		I <sub>a</sub> (mm)		K (hs) Muskingum
			A	B	A	B	A	B	A	B	Transito B
Alto	1998	365	320	295	115	100	86	96	52	12	150
Medio	2002	156	186	152	242	230	28	35	10	10	200
Medio	2005	120	149	149	101	192	25	34	10	56	187
Bajo	2011	47	45	227	380	306	35	35	30	23	300
Bajo	2001	33	350	118	314	470	20	45	10	10	20

### Parámetros del modelo de pérdidas (SCS-CN):

El parámetro de infiltración CN muestra un comportamiento similar para los eventos de caudales medios y bajos (valor entre 20 y 45), y se observa una diferencia importante con el evento de caudal alto (año 1998) el cual presenta un valor de CN de 86 y 96 para las subcuencas A y B respectivamente. El aumento significativo del CN para este último evento significa que estas cuencas presentan para este caso una menor capacidad de infiltración.



En lo que respecta al valor de las pérdidas iniciales ( $I_a$ ), cabe mencionar que presenta gran incertidumbre ya que depende de variables que son difíciles de cuantificar con la información básica disponible. Su valor, para cada evento, fue determinado mediante ajustes. La expresión  $I_a=0.2 S$ , propuesta por SCS, presentó valores superiores a los calibrados.

#### Parámetros del método de transformación lluvia-escorrentía (hidrograma de Clark):

El tiempo de concentración ( $t_c$ ) no muestra una tendencia definida, aunque presentó valores similares para los dos eventos de caudales medios.

El parámetro K de Clark mostró valores creciente a medida que el caudal disminuye, a excepción del evento del año 2005.

Por lo expuesto se ha podido inferir, en base a los hidrogramas observados y a la variación de los parámetros calibrados que la cuenca, como sistema, es sensible a las distribuciones temporales y espaciales de las precipitaciones en cada caso.

## CONCLUSIONES

Las simulaciones realizadas han permitido obtener una buena respuesta en cuanto a la forma de los hidrogramas, contemplando que las crecidas analizadas han diferido entre sí tanto en la rama ascendente como en la descendente del hidrograma observado.

La calibración de los parámetros hidrológicos, para eventos de diferentes magnitudes, mostraron gran variabilidad en sus resultados, siendo estas diferencias aún más marcadas para los eventos de caudales bajos. Se ha podido inferir que la cuenca es sensible a las distribuciones temporales y espaciales de las precipitaciones en cada caso, afectando en este caso particular los parámetros del Hidrograma de Clark ( $t_c$  y K).

El análisis de los datos de campo permitió inferir que la respuesta hidrológica de la cuenca analizada, la cual responde a las características fisiográficas de un SHNT, depende fuertemente de la precipitación total acumulada durante periodos previos a la ocurrencia del evento, es decir a la condición de humedad y saturación de la cuenca. En base a este análisis se concluye que la recurrencia de caudales altos en esta cuenca, y en los SHNT, deben realizarse considerando la probabilidad de ocurrencia conjunta de eventos de precipitaciones con años hidrológicos húmedos. En términos prácticos esto indica que cuando el objetivo del trabajo se asocia a la estimación de caudales máximos, la modelación matemática de un SHNT puede ser simulada a partir de las técnicas tradicionales empleadas para los SHT. En particular, para la cuenca analizada, para años hidrológicos húmedos cuya precipitación acumulada en un período de aproximado de 70 días previos a los eventos de precipitación supera el umbral de 400 mm, puede adoptar un funcionamiento similar a los SHT.

Finalmente se concluye que este SHNT se comporta como tal para años hidrológicos relativamente secos, remarcando la importancia de desarrollo de los procesos hidrológicos



verticales de evapotranspiración, infiltración y percolación en detrimento del tradicional proceso de transformación lluvia-caudal y escurrimiento superficial correspondiente.

## REFERENCIAS

- Bacchiega, D.; Bertoni, J.C. y Maza, J.E. (2004). Peritaje Oficial de la Inundación sufrida por la ciudad de Santa Fe (Argentina) en Abril/Mayo de 2003. Poder Judicial de la Provincia de Santa Fe, Argentina.
- Bertoni, J.C.; Zucarelli, G.V.; Morresi, M.V. Y Rodríguez, D. (1998). Aspectos fisiográficos e hidraulicos asociados a la red de drenaje santafesina. XVII Congreso Nacional del Agua. Vol 2, 364-373. Santa Fe, Argentina.
- Caamaño Nelli G, Fertoni, Predes, Quinodoz. (1979). Analysis of Non Typical Hydrological Systems. Theoretical Bases and Methodology Criteria. Departamento de Hidrologia General y Aplicada. Facultad de Ingenieria en Ciencias Hídricas. UNL. Santa Fe.
- Clark, C.O. (1945). – Storage and the unit hydrograph. ASCE Trans.
- Feldman, A. D. (2000). Hydrologic modeling system HEC-HMS: technical reference manual. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center.
- Hydrologic Engineering Centar ().- Hydrologic Modeling System HEC-HMS Technical Reference Manual. US Army Corp of Engineers, 138 pp.