

# ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS DE FUNCIÓN DE ALMACENAMIENTO EN EL MODELADO HIDROLÓGICO-HIDRÁULICO FÍSICAMENTE BASADO

**Lucía Odicini<sup>(1)</sup>, Gerardo Riccardi<sup>(1)(2)</sup> y Hernán Stenta<sup>(1)</sup>**

<sup>(1)</sup> Facultad de Cs. Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario

<sup>(2)</sup> Consejo de Investigaciones Universidad Nacional de Rosario

Riobamba 245 bis, 2000 Rosario. Telefax: 0341 4808541. e\_mail: riccardi@fceia.unr.edu.ar

## RESUMEN

En la modelación hidrológica-hidráulica de la propagación de excedentes hídricos superficiales en cuencas de llanura con modelos físicamente basados estructurados en celdas, es de importancia la abstracción que se asume en la descripción de la dinámica del llenado y vaciado de los elementos componentes del valle de inundación (función de volumen de la celda), donde el flujo se almacena transitoriamente y escurre combinando mecanismos de lento flujo mantiforme y flujo encausado parcial o totalmente. En trabajos antecedentes se ha comprobado que una sección transversal trapezoidal ha proporcionado una adecuada aproximación al mecanismo. En este caso, el ancho de la base de la sección y el talud lateral constituyen las variables geométricas de la abstracción de la función de volumen. En este trabajo se presenta la propuesta de una serie de alternativas de función de volumen, que trata de mejorar la existente, analizándose la influencia sobre la generación de caudales y niveles máximos en distintos puntos característicos de la cuenca en ensayo. En la propuesta se asumió la abstracción acerca de que la función de volumen puede ser representada con una celda equivalente conformada por una sección transversal trapecial de doble talud lateral y un posicionamiento altimétrico del fondo de la celda equivalente variable respecto a la cota media representativa del elemento. La proposición se sustenta en que en muchas celdas del ambiente de modelación, existen al menos dos “formas” de llenarse que se traducen en distintas curvaturas de la función de volumen considerada. Un primer escalón de la curva se corresponde con el mecanismo llenado de las zanjas, pequeñas depresiones e irregularidades del terreno las que al llenarse en su totalidad no ocupan una gran extensión superficial de la celda por lo cual el elemento no puede ser considerado “inundado” para un determinado nivel, un segundo escalón se corresponde con el llenado paulatino que involucra una gran extensión de la celda y consecuentemente el elemento ser considerado inundado a partir de un nivel de referencia. La cuenca de aplicación fue la del arroyo Ludueña, sistema hídrico típico de llanura con áreas fuertemente antropizadas, simulándose eventos de recurrencias ordinarias y extraordinarias.

**PALABRAS CLAVE:** función de volumen, modelado hidrológico-hidráulico, escurrimiento superficial.

## INTRODUCCIÓN

En la descripción mediante un modelo matemático hidrológico-hidráulico físicamente basado cuasi 2D de la dinámica propagatoria de una crecida, desde su generación hasta su evolución en la zona baja de una cuenca de llanura, tiene especial importancia el mecanismo real de almacenamiento de cada unidad espacial de discretización y la correspondiente abstracción respecto al mecanismo de almacenamiento que incorpora el modelo de simulación.

La heterogeneidad del relieve de cada celda del valle tributario a un curso, obliga a definir abstracciones del mecanismo de almacenamiento que pueden ir desde las de tipo cono invertido o “tolva”, a prismas irregulares. Las primeras representan un mecanismo de llenado “rápido” donde se alcanzan tirantes relevantes con relativamente poco volumen, en cambio en unidades espaciales tipo cubo las respuestas son bastantes más lentas que en el caso anterior. Esta definición de la velocidad del llenado y aumento de tirante también puede extrapolarse a la celeridad de la dinámica de la onda de crecida.

En los trabajos de Riccardi (2000) se comienza con el planteo de una cruz de conectividad con sección transversal triangular donde la variable geométrica de la sección es el talud lateral. En posteriores avances de Riccardi et al. (2008) y Stenta et al. (2007) se corrobora la abstracción de la sección transversal incorporándose el concepto de ancho mínimo, lo que transforma la sección de triangular en trapecial. Por otro lado Stenta et al. (2009) realiza trabajos de escalado de tal variable geométrica de la sección transversal cuando se cambia de escala de la grilla cuadrangular de discretización. En trabajos posteriores de Riccardi et al. (2010) plantea una sección compuesta para la definición de la función de almacenamiento (FAV). Precisamente un análisis de sensibilidad sobre esta función se presenta en este trabajo.

Una de las importantes razones para mejorar la definición de la FAV estriba en que, permite dotar de precisión a las determinaciones de la inundación o no de cada unidad espacial de discretización. Es muy habitual en la evaluación de la calidad de representación de un modelo hidrológico-hidráulico de escurrimiento superficial, la comparación de las celdas que el modelo informa como “inundadas” y las que la realidad indica que se inundan. Esta comparación es habitual realizarlas en diferentes estadios de una crecida con la asistencia de imágenes satelitales, aerofotográficas o de radar. Conceptualmente, desde el punto de vista del cálculo matemático hidrológico, una celda siempre tiene agua, el objeto es representar mediante el modelo certeramente cuando esa celda puede considerarse inundada o seca.

Este trabajo se realizó en el marco de la beca de Iniciación en la investigación que otorga la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, a través de la Secretaría de Ciencia y Tecnología. El tema de estudio es el “Mejoramiento de Modelación de Escurrimiento Superficial Orientado al Sistema de Alerta Hidrológico de las Cuencas de los Arroyos Ludueña y Saladillo”. Se pretende analizar la sensibilidad del modelo matemático frente a variaciones en las funciones de almacenamiento.

## DESARROLLO DEL TRABAJO

### **Objetivos y Metodología**

El objetivo del trabajo fue analizar la sensibilidad de la respuesta hidrológica-hidráulica del modelo matemático frente a variaciones en las funciones de almacenamiento. Para ello se propusieron distintas secciones transversales de las unidades de discretización espacial y se modelaron crecidas históricas observadas, mediante modelación matemática hidrológica-hidráulica. Para evaluar el grado de mejoramiento de diferentes técnicas se cuenta con crecidas históricas donde se han registrados limnigramas en secciones internas de la cuenca, lo que habilita a la comparación de limnigramas calculados vs. observados.

Las simulaciones se realizaron mediante el modelo matemático hidrológico-hidráulico, físicamente basado y espacialmente distribuido cuasi-bidimensional VMMHH 1.0 (Riccardi et al., 2009). Dicho modelo cuenta con la ventaja de ser actualizado sistemáticamente ya que se lo utiliza como herramienta de simulación de escurrimiento superficial en el sistema de alerta ante inundaciones en el gran Rosario.

A partir de las simulaciones de crecidas realizadas en el marco del desarrollo de un modelo de pronóstico de niveles en la cuenca del arroyo Ludueña, se procedió a realizar el análisis de sensibilidad de los parámetros geométricos de las secciones transversales de las celdas, modificando por ende la función del almacenamiento de cada unidad espacial.

El análisis de variación del almacenamiento se llevó a cabo en crecidas asociadas a eventos ordinarios presentados entre los años 2008 y 2010 y también en la reproducción de una crecida extrema ocurrida en el año 2007. Se estudiaron 8 sitios de interés de la cuenca y se evaluó la incidencia tanto en niveles como de caudales, aprovechando la capacidad del modelo de simulación de describir ambas variables hidráulicas.

### **Breve descripción del modelo matemático**

El modelo matemático hidrológico-hidráulico, físicamente basado y espacialmente distribuido cuasi-bidimensional empleado es el VMMHH 1.0 (Riccardi et al., 2009). Esta herramienta tecnológica es la última actualización de la fusión entre el modelo matemático hidrológico-hidráulico CTSS8 (Riccardi, 2000; Riccardi et al. 2008) y la plataforma en sistema de ventanas para pre y post procesamiento de información y resultados SIMULACIONES (Stenta et al. 2005). El sistema de modelación está basado en los esquemas de celdas originalmente propuestos por Cunge (1975). El sistema permite la simulación de escurrimiento superficial multidireccional en ambientes rurales y urbanos. En cada unidad de la capa superficial es posible plantear el ingreso de flujo proveniente de precipitación neta, aporte de caudales externos e intercambio de caudales con celdas adyacentes. Para la información necesaria de lluvia neta en cada celda se plantea la utilización de las metodologías reconocidas de Green y Ampt o del Servicio de Conservación del Suelo de EEUU (Chow, et. al, 1994). El escurrimiento resultante puede ser propagado mediante un espectro de leyes de descarga desde aproximaciones cinemáticas a difusivas de la ecuación de momento, permitiendo el tránsito por ríos, canales y valles de inundación. Para contemplar alternativas puntuales de flujo se incorporaron leyes de descarga para puentes, vertederos y alcantarillas. Las ecuaciones gobernantes consideradas son la de continuidad y distintas simplificaciones de la ecuación de cantidad de movimiento transformadas en formulaciones de descarga entre celdas. La distribución espacial de los parámetros y variables hidrológicas se realiza mediante la subdivisión de la cuenca en celdas de igual tamaño (cuadrangulares) interconectadas

entre sí que definen el dominio del sistema hídrico a modelar. Las celdas pueden ser tipo valle o río que representan el flujo superficial y en canal respectivamente. De esta forma; las celdas tipo río representan cursos de agua permanente y/o transitorios de importancia y las celdas tipo valle representan las áreas tributarias a estos.

### Formulación del Sistema de Modelación

El sistema de modelación está basado en los esquemas de celdas originalmente propuestos por Cunge (1975). Actualmente, el sistema permite la simulación de generación de excedentes superficiales, el escurrimiento superficial multidireccional en ambientes rurales y urbanos, como así también la propagación de crecidas en grandes ríos. En cada unidad de discretización espacial el balance de volúmenes es manejado por el planteo de la ecuación de continuidad, en tanto que el escurrimiento superficial resultante puede ser propagado mediante un espectro de leyes de descarga desde aproximaciones cinemática, difusiva y dinámica, de la ecuación de momento, permitiendo el tránsito por ríos, canales, conductos y valles de inundación. Para contemplar alternativas puntuales de flujo se incorporaron leyes de descarga para puentes, vertederos, alcantarillas y terraplenes. Las ecuaciones gobernantes consideradas son la de continuidad y distintas simplificaciones de la ecuación de cantidad de movimiento transformadas en formulaciones de descarga entre celdas (Riccardi, 2001)

### Ecuación de Continuidad

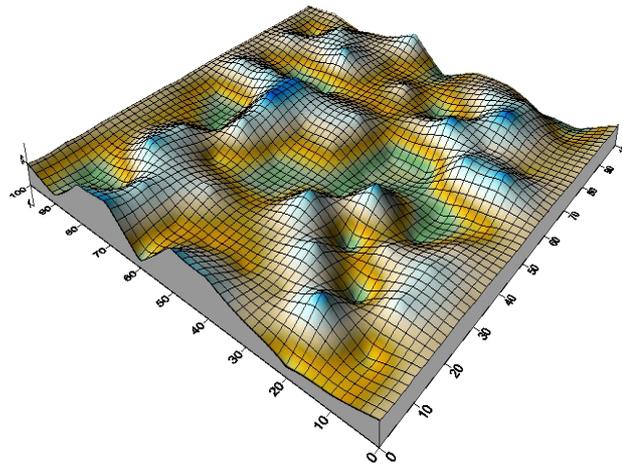
La ecuación de continuidad se plantea en cada celda, a partir de la definición del incremento del volumen de agua almacenada desde consideraciones geométricas y desde condiciones de descarga:

$$A_{Si} \frac{dz_i}{dt} = P_{i(t)} + \sum_{k=1}^j Q_{k,i} \quad (1)$$

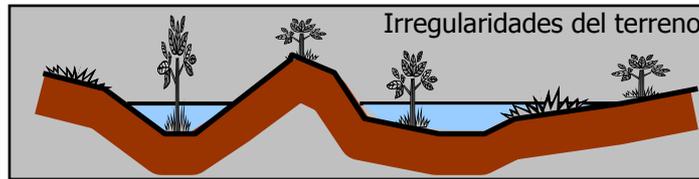
donde  $P_i(t)$  es lluvia, intercepción, almacenamiento superficial, infiltración e intercambio externo de caudales en la celda  $i$ ,  $A_{Si}$  y  $z_i$  área mojada superficial y nivel de agua en celda  $i$ ;  $Q_{k,i}$  caudal intercambiado entre celdas  $k$  e  $i$ . La función de almacenamiento (FAV) interviene en la ecuación de continuidad mediante la definición del área superficial mojada  $A_{Si}$ .

### La función de almacenamiento (FAV) incorporada al modelo

Es sabido que el escurrimiento transitando por celdas tributarias de una cuenca de llanura puede asemejarse a un flujo mantiforme con pocos centímetros de tirante. Asimismo, puede verificarse mediante la observación del mecanismo hidráulico que dicho flujo no forma una lámina completa en toda una celda, sino que se estructura mayormente en pequeños hilos de escurrimiento, surcos (muy relevante si se trata de áreas de cultivos) y pequeñas zanjás que se van interconectando a medida que aumenta el caudal y conectando a su vez eventuales depresiones aisladas. Este mecanismo está fuertemente vinculado al microrelieve presente en la superficie (Figura 1a). Un perfil esquemático del terreno natural se representa en la Figura 1b. Solamente en el caso de que el escurrimiento tenga un tirante relativamente importante (por encima de toda irregularidad del terreno y vegetación presente en la celda), el ancho completo de la sección transversal estará disponible para el almacenamiento y la conducción del flujo.



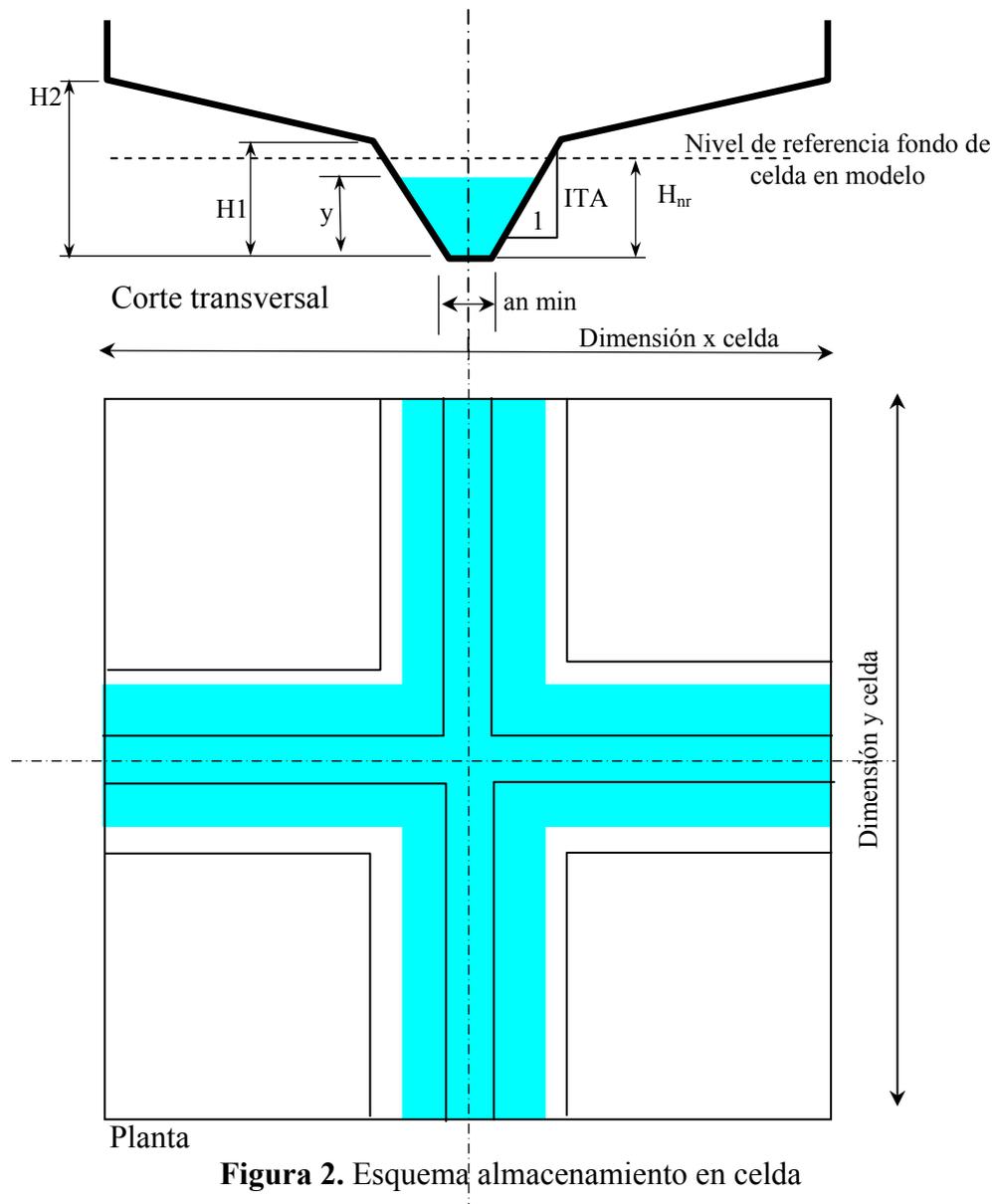
(a)



(b)

**Figura 1.** Morfología de una celda tipo.  
 (a) Esquema del microrelieve; (b) Perfil transversal

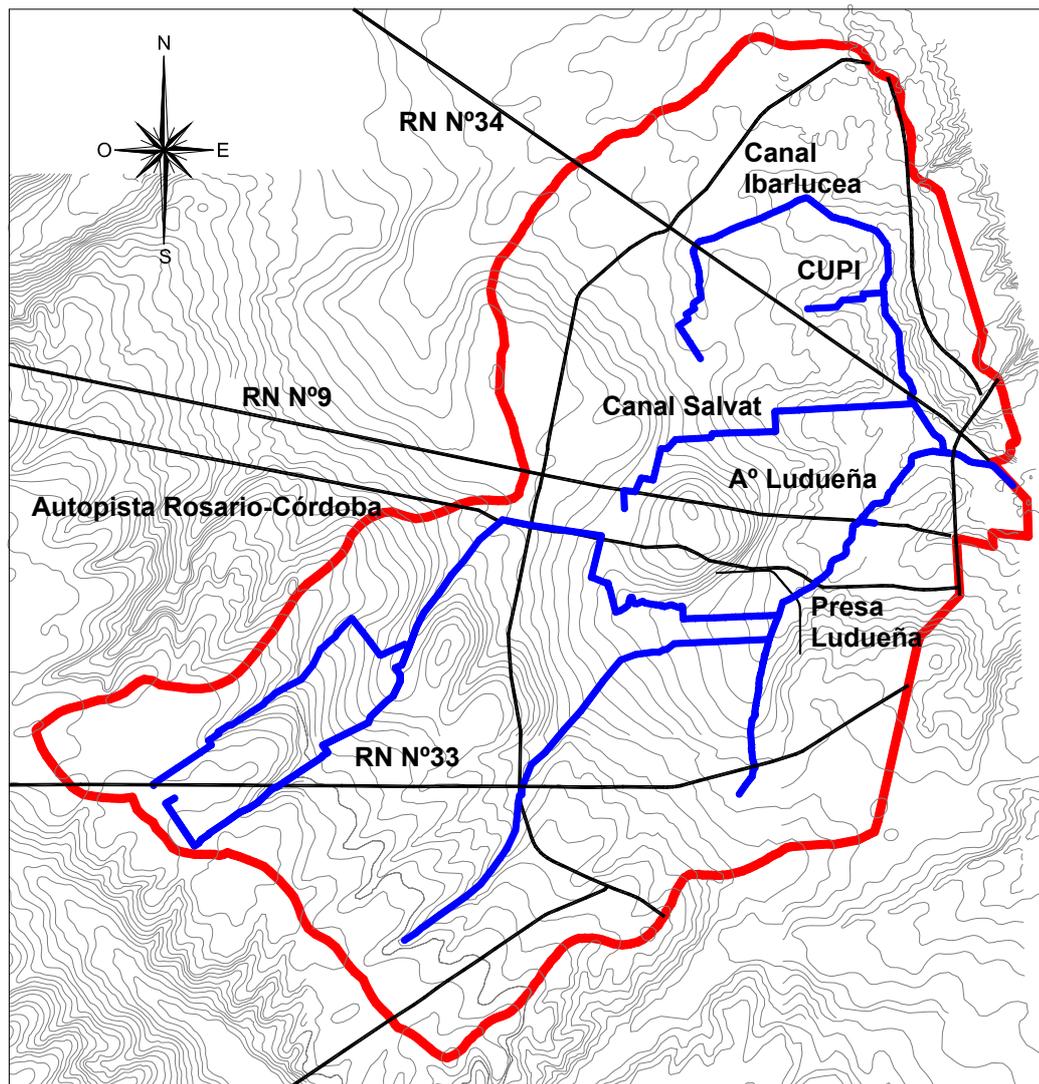
Actualmente el modelo VMMHH 1.0 cuenta con una abstracción de almacenamiento basado en un nodo conectivo tipo cruz con una geometría transversal triangular-trapecial compuesta. Se parametriza la variabilidad de la morfología del terreno dentro de la celda considerando variables geométricas tales como: el ancho mínimo ( $an_{min}$ ), la pendiente transversal del área baja (ITA), la altura con pendiente transversal ITA ( $H_1$ ), la altura total de la celda ( $H_1$ ) y la altura de referencia del fondo ( $H_{nr}$ ). Esta última altura representa la diferencia de cotas entre el punto más bajo de la sección adoptada y el considerado como valor medio de fondo de celda. Los parámetros geométricos mencionados se esquematizan en la Figura 1, donde se esquematiza la abstracción de almacenamiento en una celda.



**Figura 2.** Esquema almacenamiento en celda

### **La Cuenca del Arroyo Ludueña**

La cuenca del A° Ludueña se encuentra situada entre los paralelos 32° 45' S y 33° 08' S y los meridianos 61° 04' O y 60° 39' O; perteneciendo a la provincia de Santa Fe (Argentina); engloba parte del casco urbano de la ciudad de Rosario y desemboca en el río Paraná. Tiene un área de aporte de aproximadamente 740 km<sup>2</sup> y una pendiente media de 1,4 por mil. La red hídrica principal está constituida por el A° Ludueña y los canales Ibarlucea y Salvat, mientras que en épocas de lluvia se adicionan numerosos y pequeños cursos naturales (cañadones) y artificiales que aportan al escurrimiento. La región se encuentra atravesada por importantes terraplenes tanto viales como ferroviarios. La red de cursos y canales primaria tiene una extensión de aproximadamente 140 km, en tanto que con el agregado de cunetas y canales secundarios esta longitud de vías de drenaje alcanza los 360 km. En la Figura 3 se esquematiza la cuenca. La densidad de drenaje considerando solamente los cursos naturales es de 0.19 km/km<sup>2</sup>, en tanto que al cabo de la alteración antrópica alcanzada a la fecha, la densidad de drenaje asciende a 0.49 km/km<sup>2</sup>, lo que conforma una importante indicador del grado de transformación que ha sufrido la cuenca.



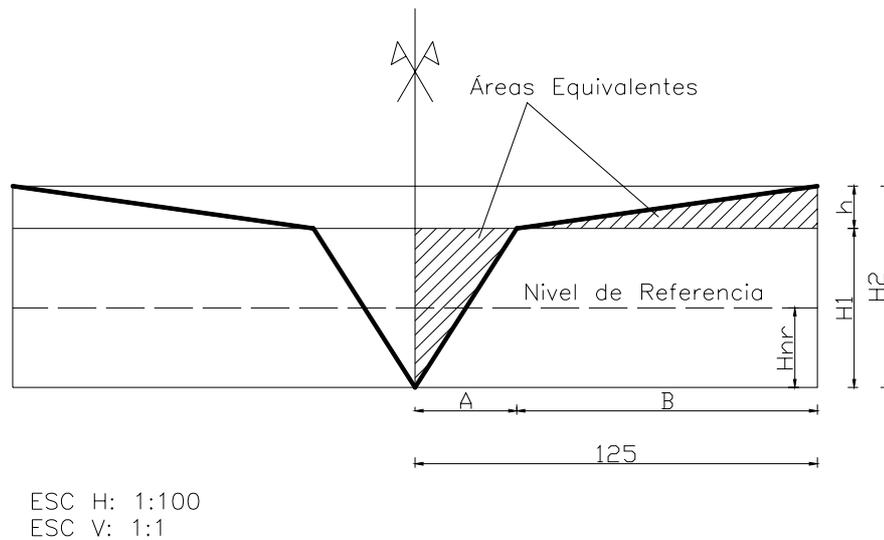
**Figura 3.** Esquema Cuenca del Arroyo Ludueña. Sección de cierre en Embocadura.

### **Ensayos Realizados**

Se parte de una condición de referencia correspondiente al modelo calibrado en trabajos antecedentes en función de datos registrados de caudales y alturas observados (Riccardi et al., 2008; Riccardi et al., 2010). Dicha condición tiene como parámetros geométricos un ITA de 0.019 y valores de  $H1 = 1\text{m}$ ,  $H2 = 1.73\text{m}$  y altura del plano de referencia  $H_{nr} = 1\text{m}$ .

En primer lugar se plantea la variación del ITA, con lo cual se estudian dos situaciones:  $\text{ITA} = 0.0095$  (la mitad de la pendiente inicial) e  $\text{ITA} = 0.038$  (el doble de la pendiente inicial).

En segundo lugar se plantea la variación del parámetro de altura  $H1$ , con la correspondiente variación de  $H2$ . Se debe mencionar que al modificar el parámetro  $H1$ , se obtuvo el  $H2$  correspondiente al considerar equivalentes las áreas que se observan sombreadas en la Figura 4 que se muestra a continuación.



**Figura 4.** Sección geométrica de celda valle. Parámetros geométricos.

Los valores que se analizaron fueron  $H1 = 1\text{m}$  con  $H2 = 1.73\text{m}$  y  $H1 = 0.5\text{m}$  con  $H2 = 0.63\text{m}$ . En una primera instancia el nivel de referencia se consideró coincidente con el quiebre de la pendiente transversal de la celda ( $H1 = Hnr$ ). Posteriormente se planteó la variación de la posición del plano de referencia con  $H1 = 1\text{m}$ ,  $H2 = 1.73\text{m}$  con  $Hnr = 1\text{m}$  y con  $Hnr = 0.5\text{m}$  y  $H1 = 0.5\text{m}$ ,  $H2 = 0.63$  con  $Hnr = 0.5\text{m}$  y con  $Hnr = 1\text{m}$ . En la siguiente Tabla 1 se listan los ensayos realizados

Tabla 1. Variaciones de los parámetros geométricos de la sección

Pendiente Transversal ITA	H1 (m)	H2 (m)	Hnr (m)
0.0095	1.00	1.73	1.00
0.019	1.00	1.73	1.00
0.038	1.00	1.73	1.00
0.019	0.50	0.63	1.00
0.019	0.50	0.63	0.50
0.019	1.00	1.73	0.50

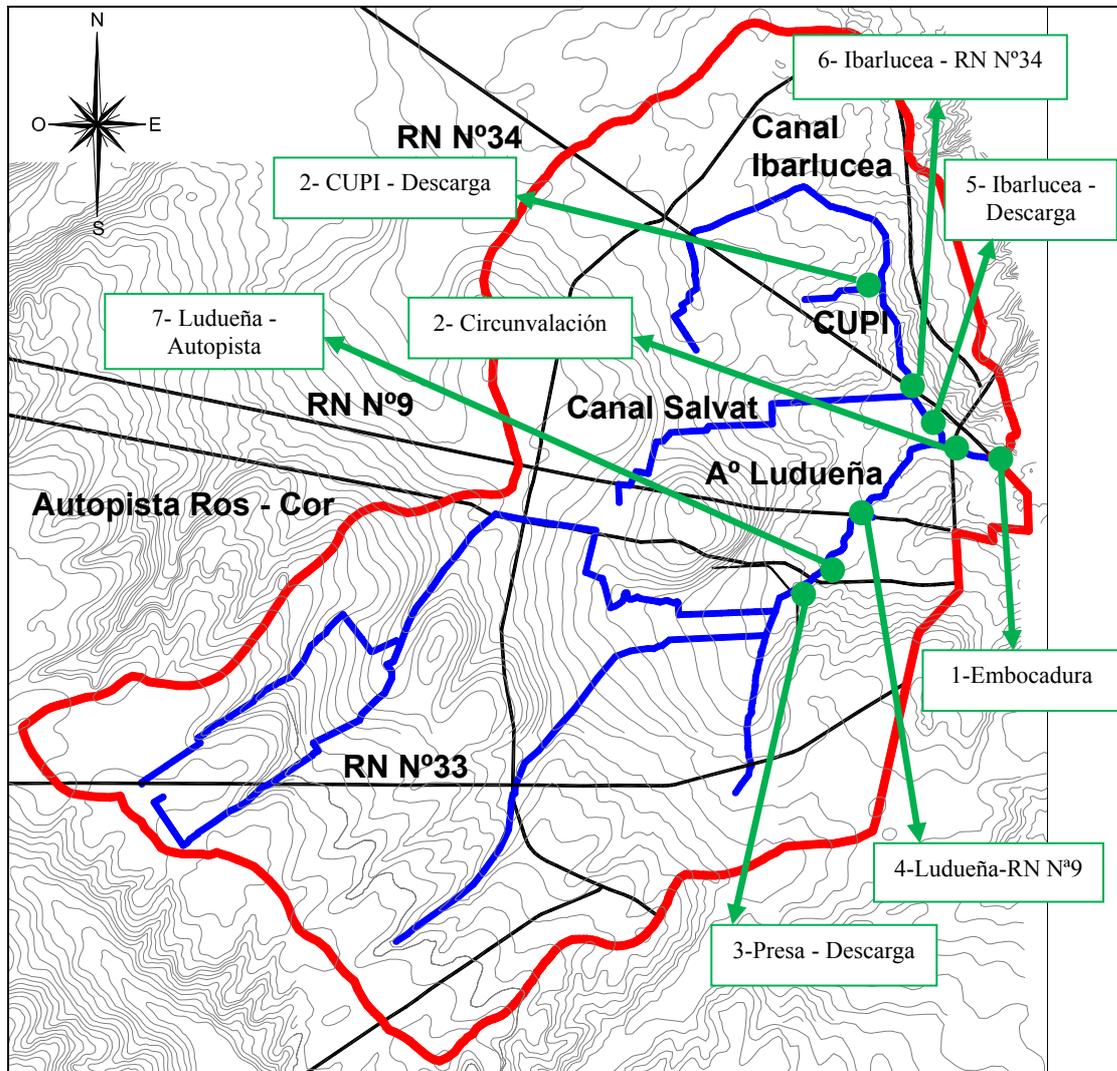
### **Sitios geográficos de comparación**

Como se mencionó con anterioridad los sitios geográficos de interés en la cuenca, en los cuales se analizó la respuesta del modelo en términos de caudales y niveles, son ocho (8). Estos puntos fueron elegidos ya que son de interés en la cuenca, de fácil accesibilidad y se cuenta con información respecto a alturas y caudales en los mismos. Los mismos se enumeran a continuación:

- 1- Embocadura de Ludueña.
- 2- Arroyo Ludueña y Puente de Circunvalación.
- 3- Sección aguas abajo de Presa de Retención de Crecidas.
- 4- Arroyo Ludueña y Puente Ruta Nacional N°9.
- 5- Canal Ibarlucea antes de su descarga en el arroyo Ludueña.

- 6- Canal Ibarlucea y Puente Ruta Nacional N°34.
- 7- Arroyo Ludueña y Puente Autopista Rosario-Córdoba.
- 8- CUPI antes de su descarga en el canal Ibarlucea.

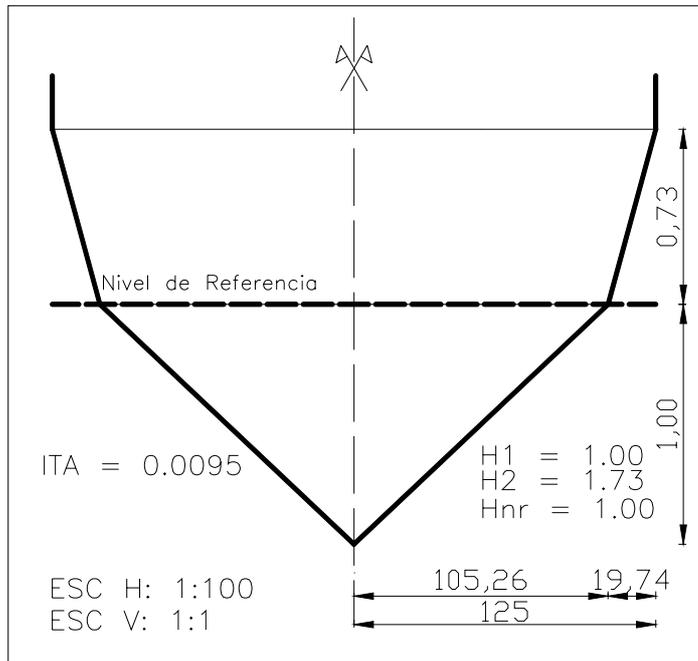
Puede observarse la ubicación de cada sitio en la Figura 5.



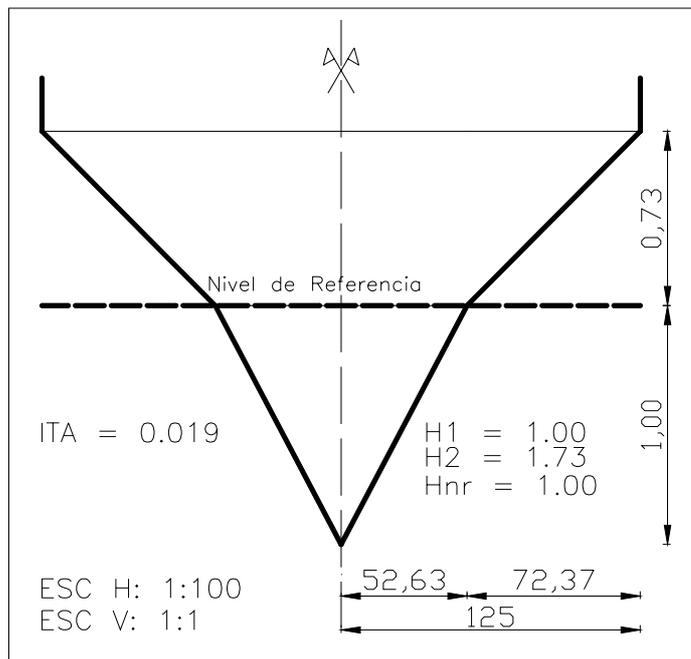
**Figura 5.** Cuenca del A° Ludueña. Sitios Estudiados.

### Combinaciones de parámetros geométricos

A continuación se presentan las combinaciones geométricas analizadas. Cada celda tiene una dimensión espacial de 250 m x 250 m, con lo cual quedan definidos los perfiles transversales de las celdas resultantes que se muestran en las figuras 6 a 11. Debe destacarse la distorsión que se produce en la representación por causa de la utilización de escalas diferenciadas en horizontal y vertical.

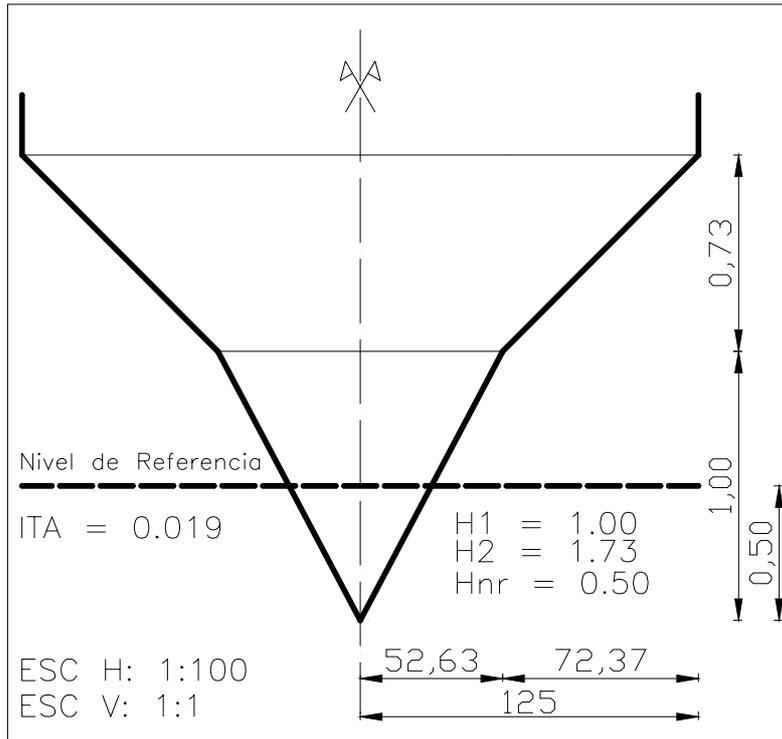


**Figura 6.** Esquema de sección geométrica en celda valle.  
ITA = 0.0095 – H1 = 1.00 m – H2 = 1.73 m – Hnr = 1.00 m

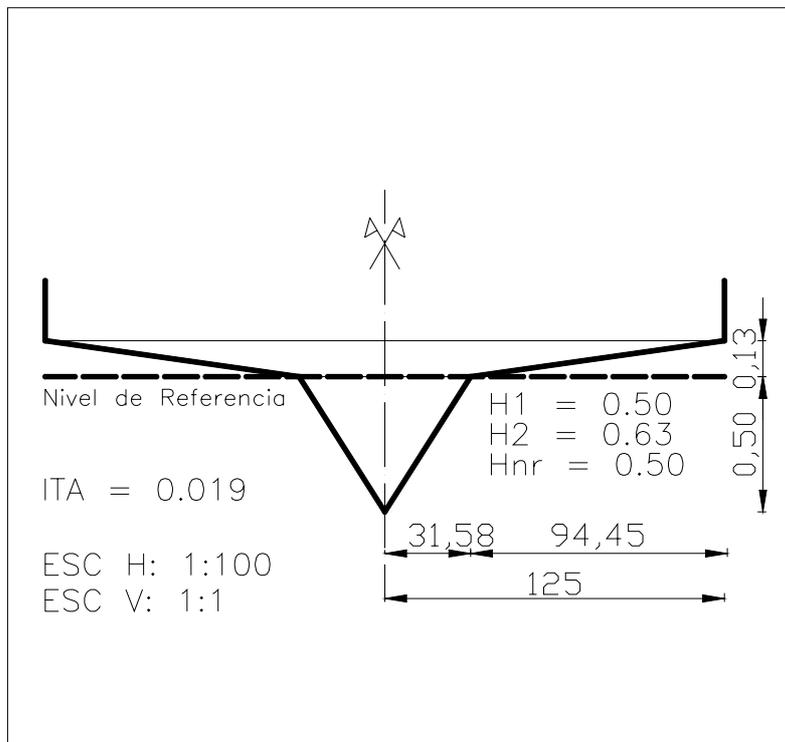


**Figura 7.** Esquema de sección geométrica en celda valle.  
ITA = 0.019 – H1 = 1.00 m – H2 = 1.73 m – Hnr = 1.00 m





**Figura 10.** Esquema de sección geométrica en celda valle.  
 ITA = 0.019 – H1 = 1.00 m – H2 = 1.73 m – Hnr = 0.50 m



**Figura 11.** Esquema de sección geométrica en celda valle.  
 ITA = 0.019 – H1 = 0.50 m – H2 = 0.63 m – Hnr = 0.50 m

## **Tormentas analizadas**

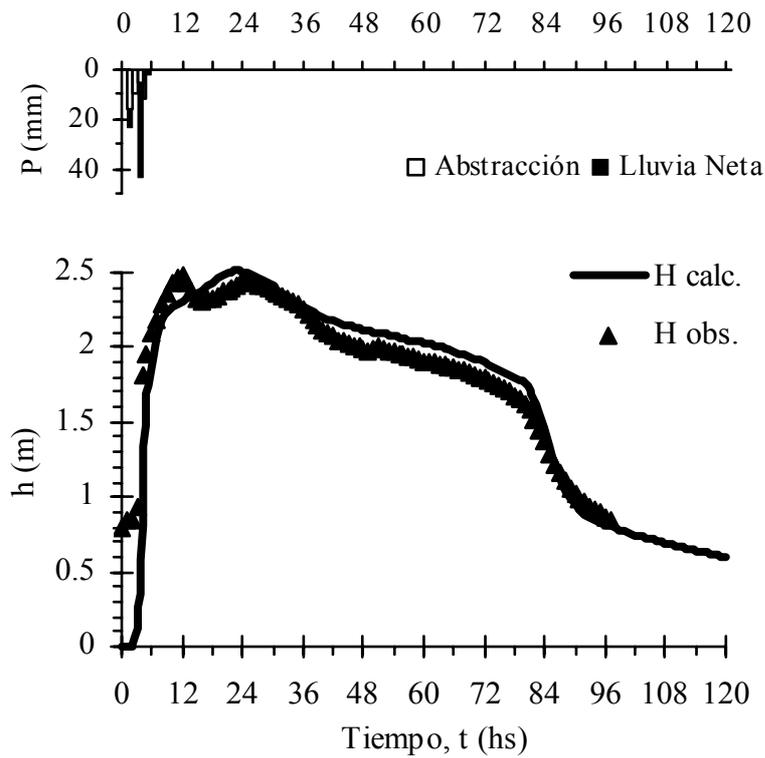
Para el estudio se utilizaron dos tipos de tormentas observadas en la cuenca, con características totalmente diferenciadas en lo que concierne a la lámina total precipitada y a la duración del evento. Una primer tormenta correspondió a un evento tipo aguacero, de corta duración y la segunda tormenta correspondió a una tormenta extrema de 5 días de duración. El motivo por el cual se estudian dos lluvias de diferente magnitud y distribución temporal es el de garantizar que los resultados de los ensayos comprendan tanto crecidas ordinarias como extraordinarias. Las tormentas utilizadas son las que se describen a continuación.

- Tormenta Ordinaria: corresponde a una tormenta observada en el mes de noviembre del 2009; la precipitación total es de 90mm y la lluvia neta que se obtuvo mediante Green y Ampt de 30mm (Figura 12)
- Tormenta Extraordinaria: tormenta observada en el mes de marzo del 2007; la lluvia total de esta tormenta es de 365mm y la lluvia neta que también se obtuvo con el método de Green y Ampt es de 145mm (Figura 13)

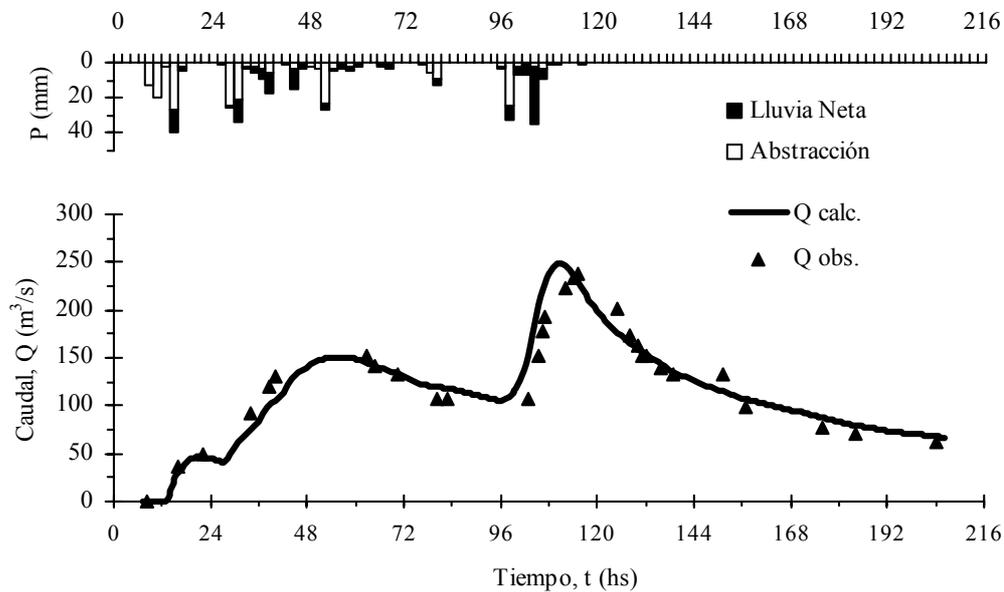
Vale destacar que en ambos eventos la lluvia neta, fue corroborada con el volumen escurrido computado a partir del hidrograma saliente por el sitio 2 (Circunvalación).

En la Figura 12 se presentan el hietograma medio (total y neto) conjuntamente los limnigramas observado y calculado para el evento de noviembre de 2009, en tanto que en la Figura 13 se presentan el hietograma conjuntamente con los hidrogramas observado y calculado con el modelo matemático para el evento de marzo del 2007. Estas figuras permiten ilustrar a modo cualitativo los resultados que arroja el modelo con los parámetros calibrados ( $ITA = 0.019$  ;  $H1 = 1.00$  m;  $H2 = 1.73$  m  $Hnr = 1.00$  m) en el contraste con valores observados.

En el caso de los limnigramas, estos valores fueron medidos directamente a partir de estaciones de aforos existentes. En el caso de los hidrogramas, los valores fueron obtenidos en forma indirecta a partir de aforos de niveles y su transformación en caudales mediante una curva H-Q desarrollada en trabajos antecedentes (ver x ejemplo Riccardi et al., 2010).



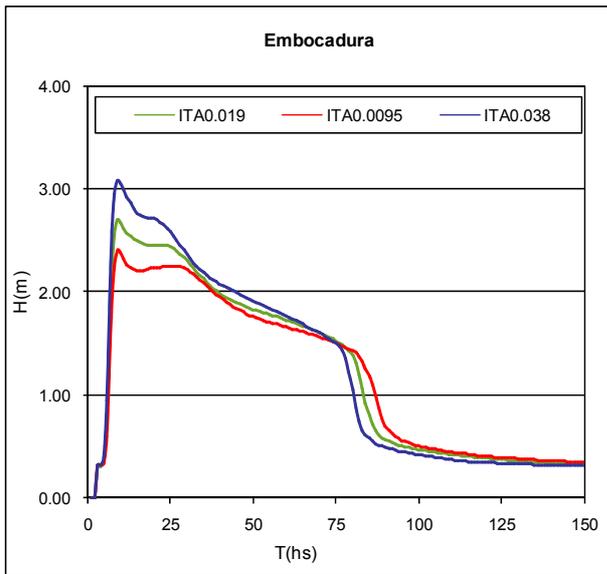
**Figura 12.** Evento 19 de noviembre de 2010. Hietograma medio-Liminigramas observado y calculado sitio Circunvalación.  $P=90$  mm;  $P_{\text{neta}}=30$  mm



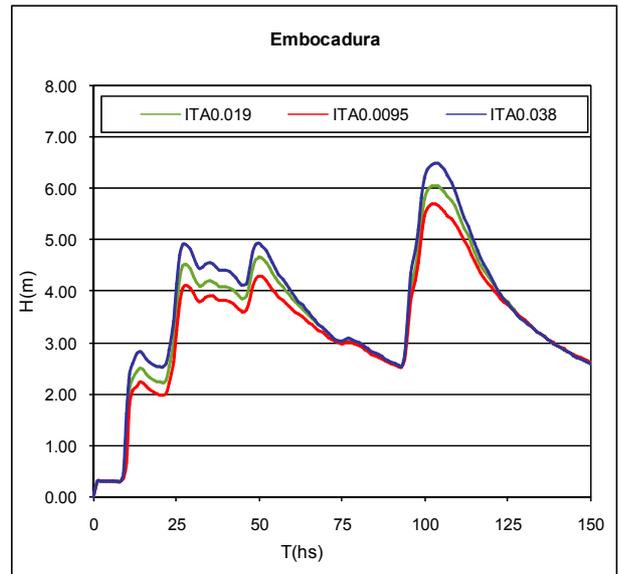
**Figura 13.** Evento 26 al 30 de marzo de 2007. Hietograma medio-Hidrogramas observado y calculado sitio Circunvalación.  $P=365$  mm;  $P_{\text{neta}}=145$  mm

## Resultados

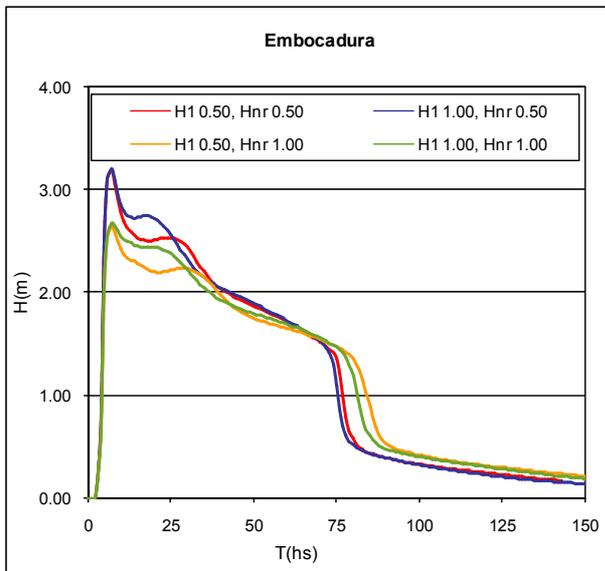
A continuación en las Figuras 14 a 21 se presentan los limnigramas obtenidos de los ensayos en los cuales se pueden observar las variaciones de altura generadas con las distintas combinaciones de variables. En todos las graficaciones, se ilustra en color verde, los resultados correspondientes a la alternativa de FAV presentada en la Figura 7, y que fue considerada de referencia por originarse a partir de calibraciones realizadas en modelaciones antecedentes



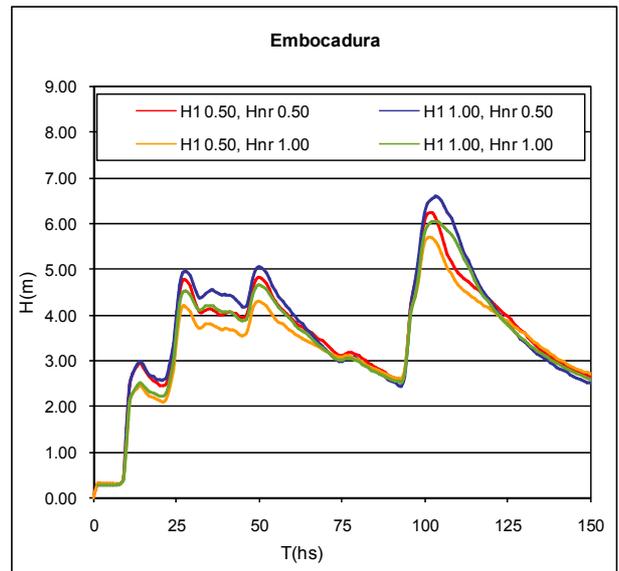
(a1)



(a2)

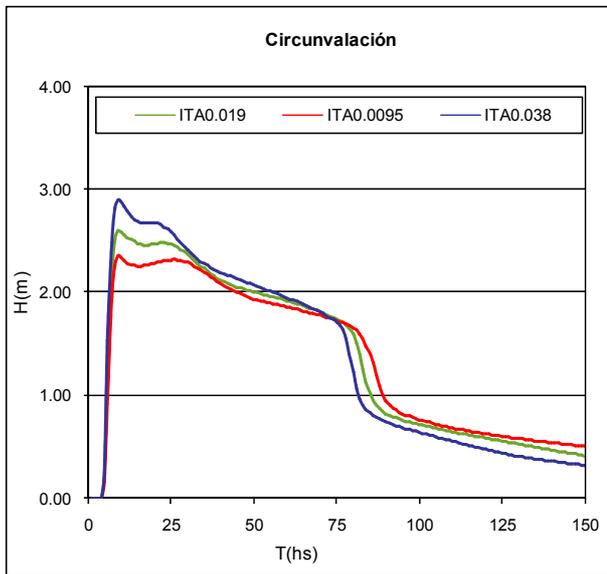


(b1)

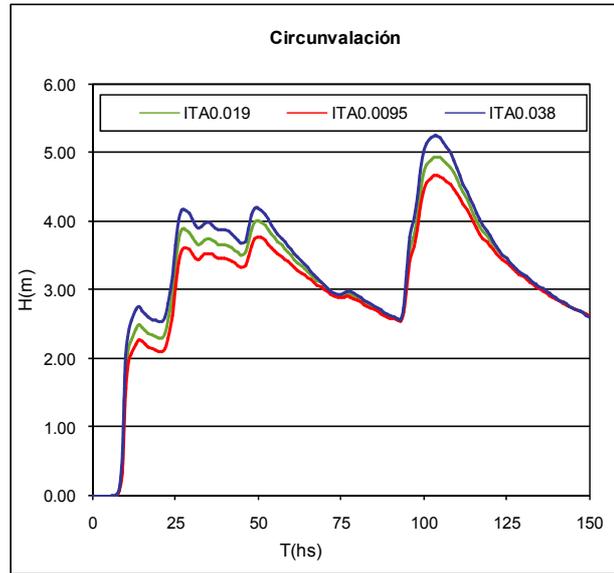


(b2)

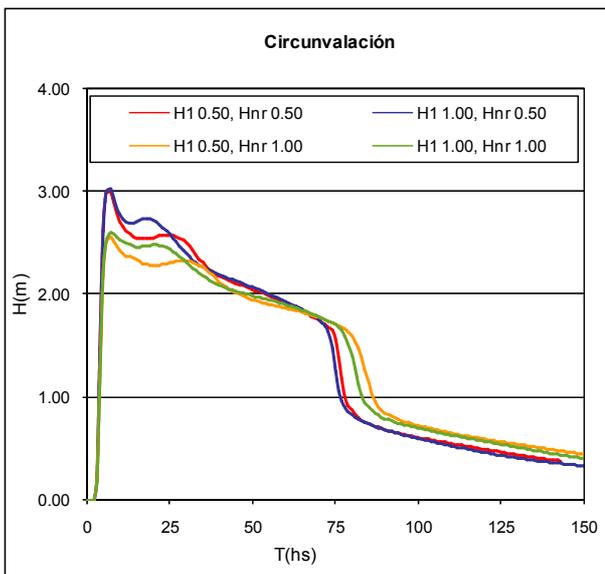
**Figura 14.** Limnigramas en Sitio 1 Embocadura. (a) ITA variable, (a1) tormenta ordinaria, (a2) tormenta extraordinaria; (b)  $H1$ ,  $H2$  y  $Hnr$  variable, (b1) tormenta ordinaria, (b2) tormenta extraordinaria



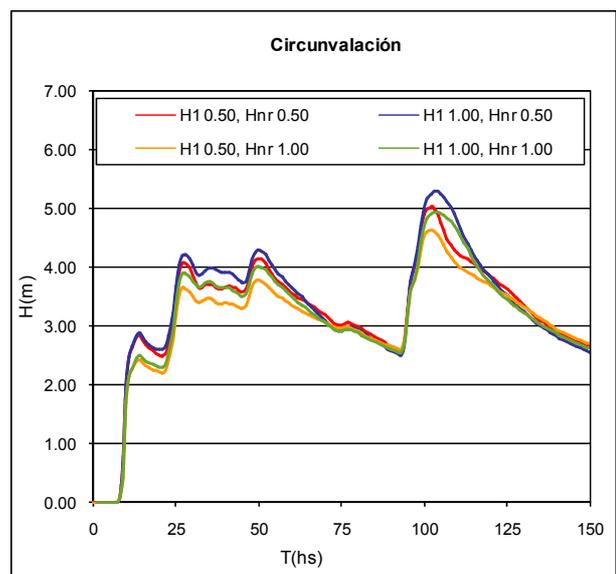
(a1)



(a2)

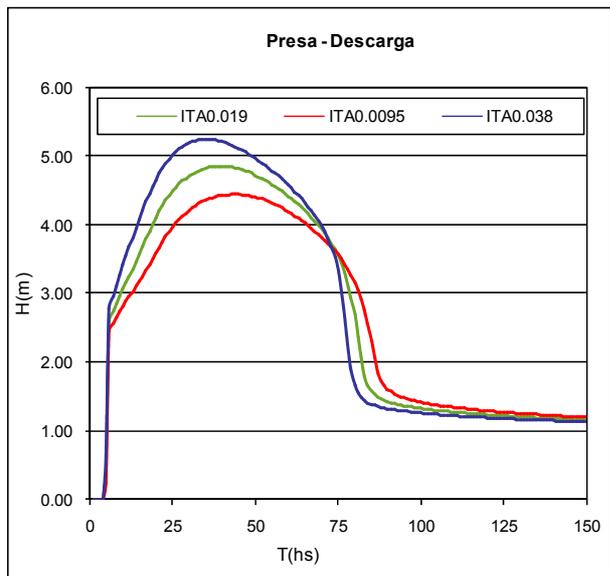


(a1)

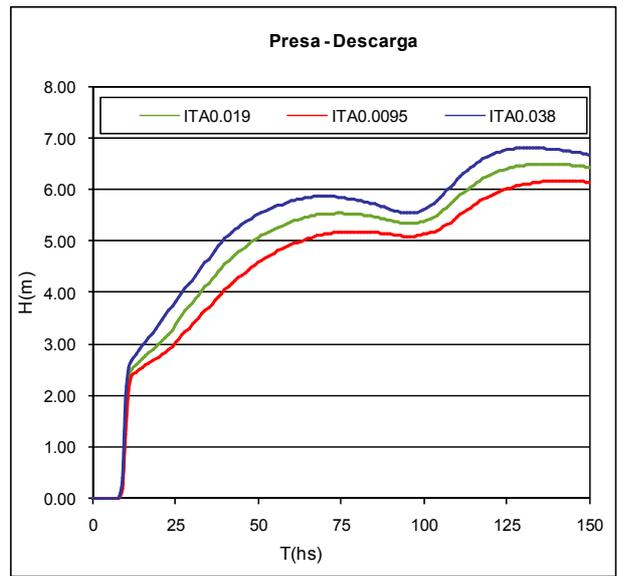


(a2)

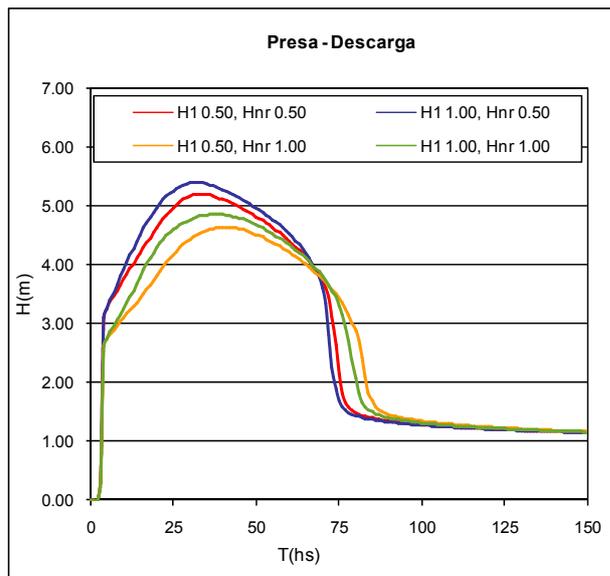
**Figura 15.** Linnigramas en Sitio 2 Circunvalación. (a) ITA variable, (a1) tormenta ordinaria, (a2) tormenta extraordinaria; (b) H1, H2 y Hnr variable, (b1) tormenta ordinaria, (b2) tormenta extraordinaria



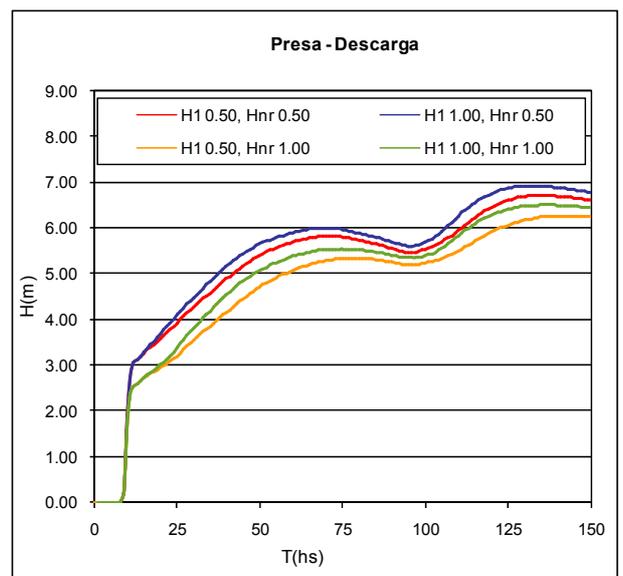
(a1)



(a2)

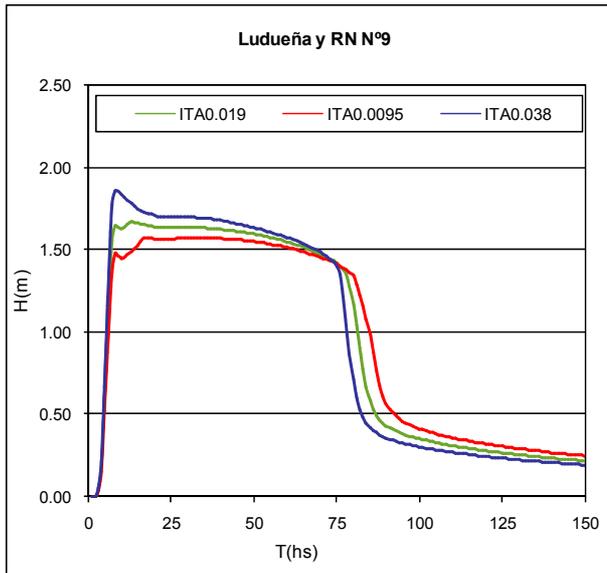


(b1)

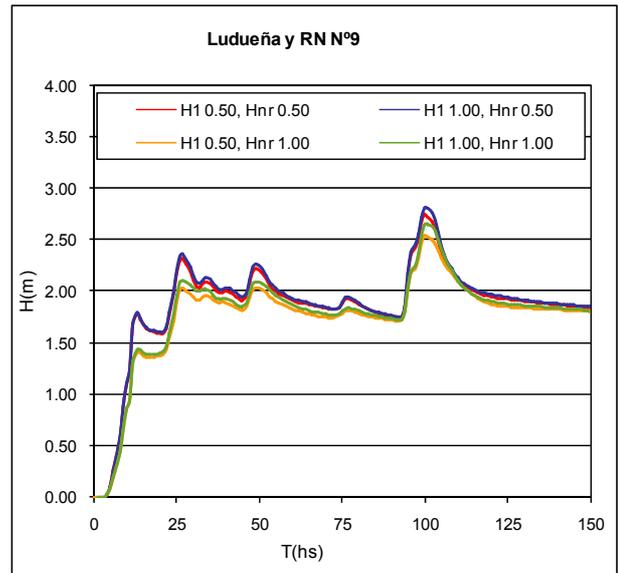


(b2)

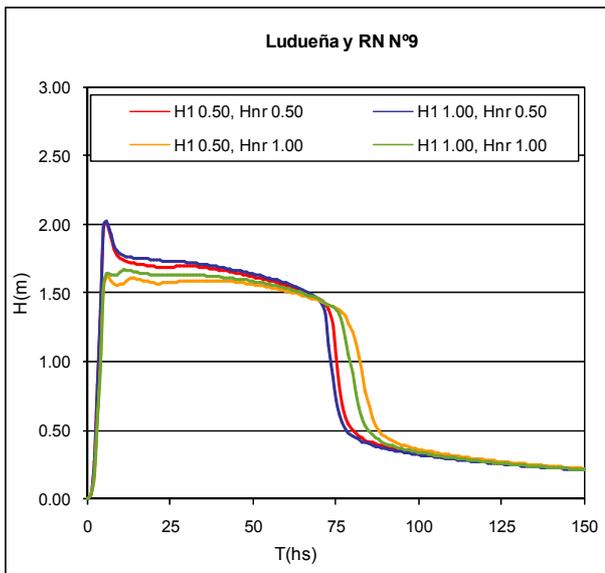
**Figura 16.** Limnigramas en Sitio 3 Presa-Descarga. (a) ITA variable, (a1) tormenta ordinaria, (a2) tormenta extraordinaria; (b) H1, H2 y Hnr variable, (b1) tormenta ordinaria, (b2) tormenta extraordinaria



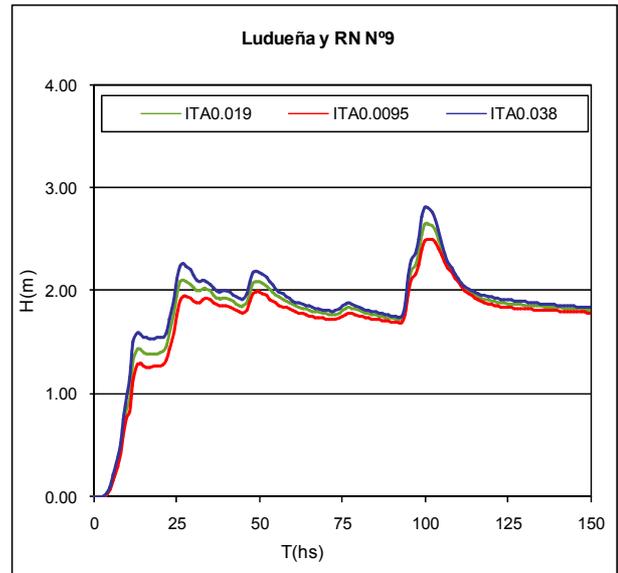
(a1)



(a2)

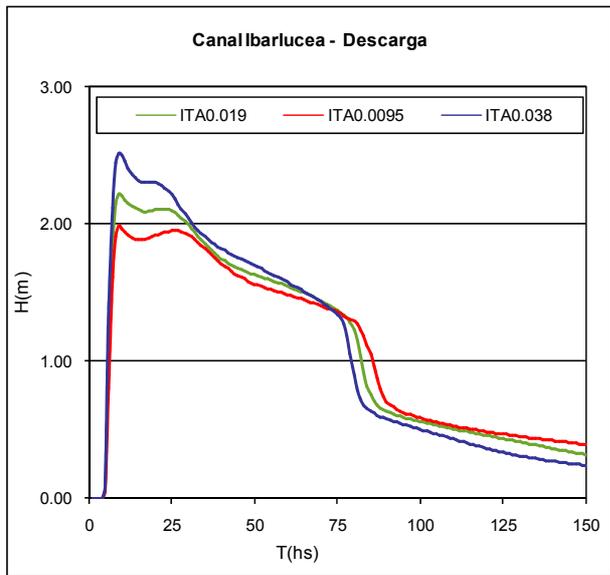


(b1)

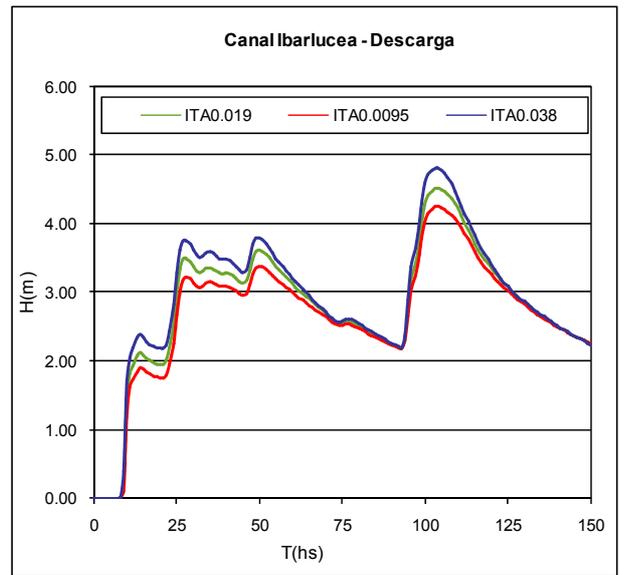


(b2)

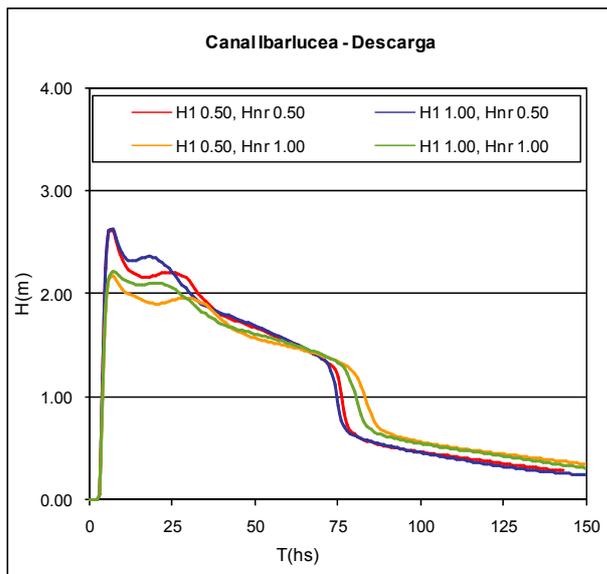
**Figura 17.** Limnigramas en Sitio 4 Ludueña y Puente sobre Ruta Nac. 9; (a) ITA variable, (a1) tormenta ordinaria, (a2) tormenta extraordinaria; (b) H1, H2 y Hnr variable, (b1) tormenta ordinaria, (b2) tormenta extraordinaria



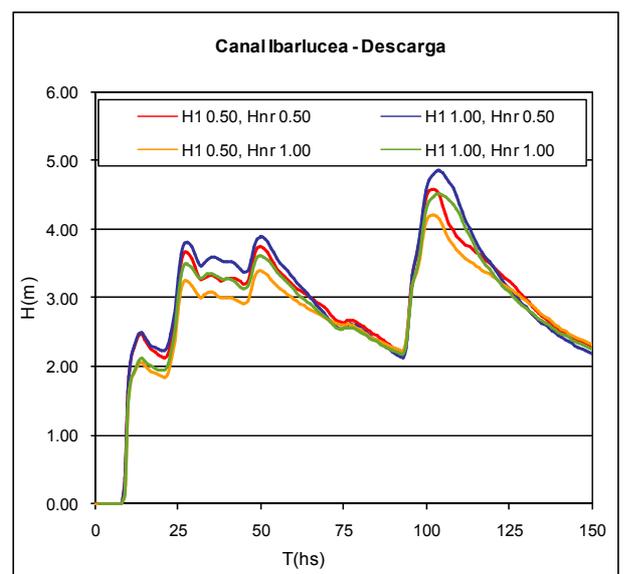
(a1)



(a2)

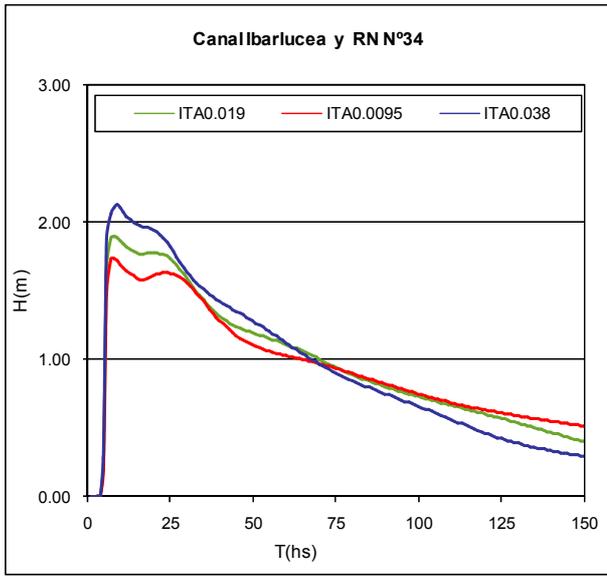


(b1)

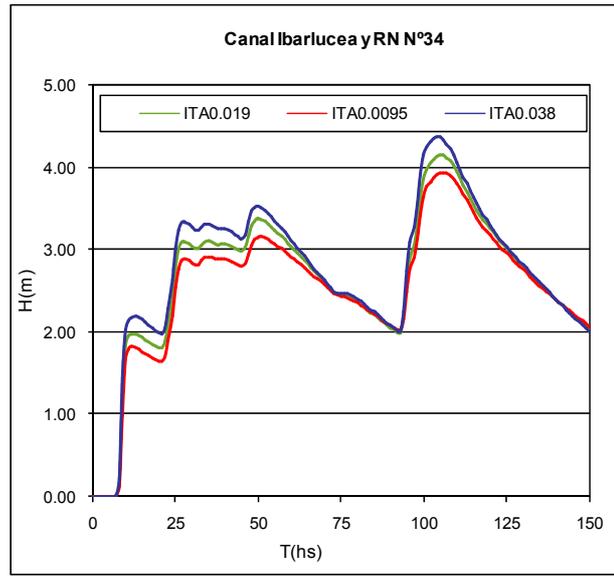


(b2)

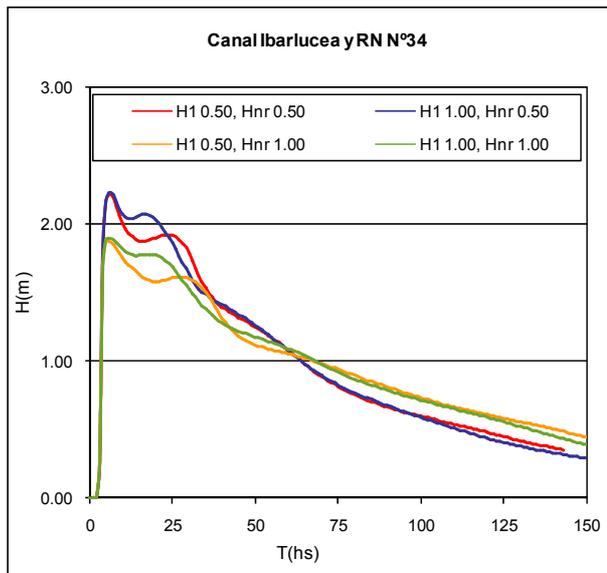
**Figura 18.** Limnigramas en Sitio 5 Canal Ibarlucea Descarga; (a) ITA variable, (a1) tormenta ordinaria, (a2) tormenta extraordinaria; (b) H1, H2 y Hnr variable, (b1) tormenta ordinaria, (b2) tormenta extraordinaria



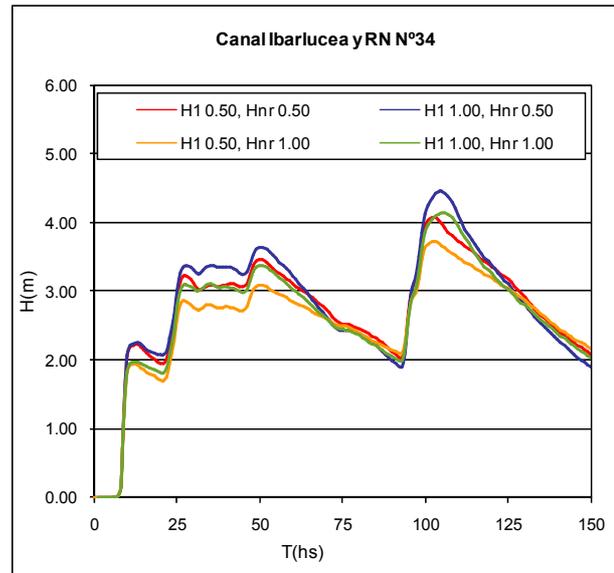
(a1)



(a2)

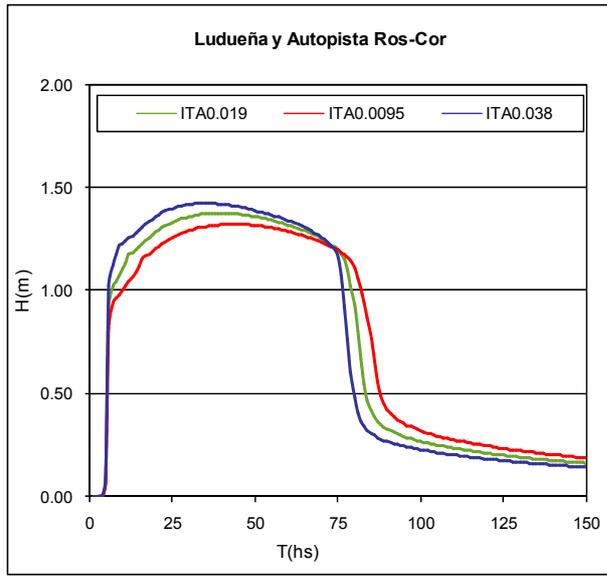


(b1)

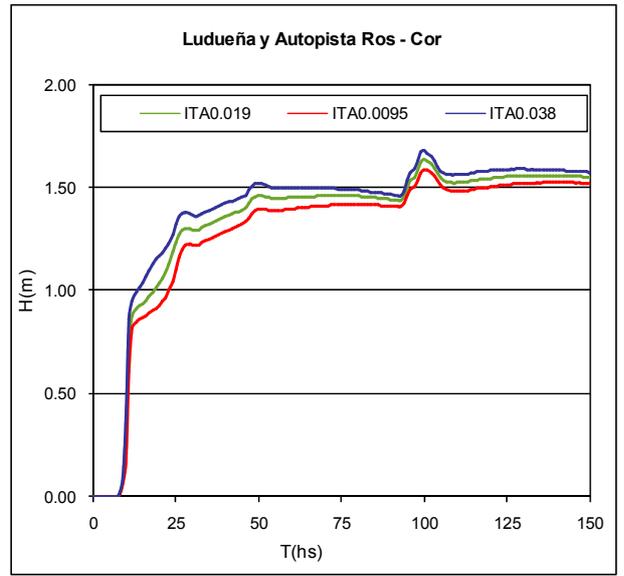


(b2)

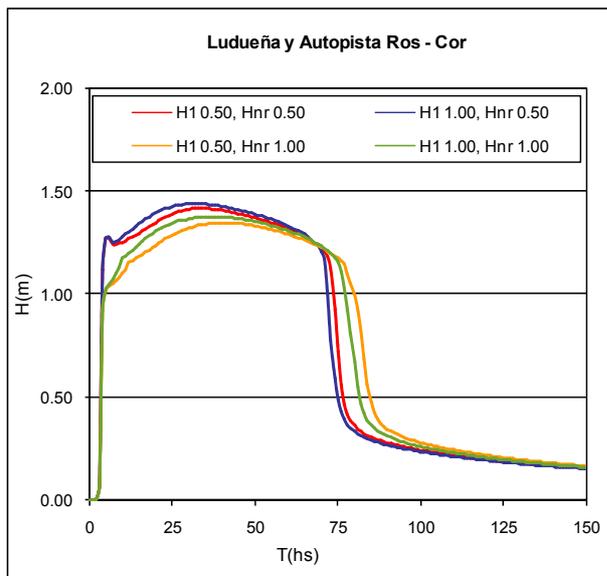
**Figura 19.** Limnigramas en Sitio 6 Canal Ibarlucea y RN 34; (a) ITA variable, (a1) tormenta ordinaria, (a2) tormenta extraordinaria; (b) H1, H2 y Hnr variable, (b1) tormenta ordinaria, (b2) tormenta extraordinaria



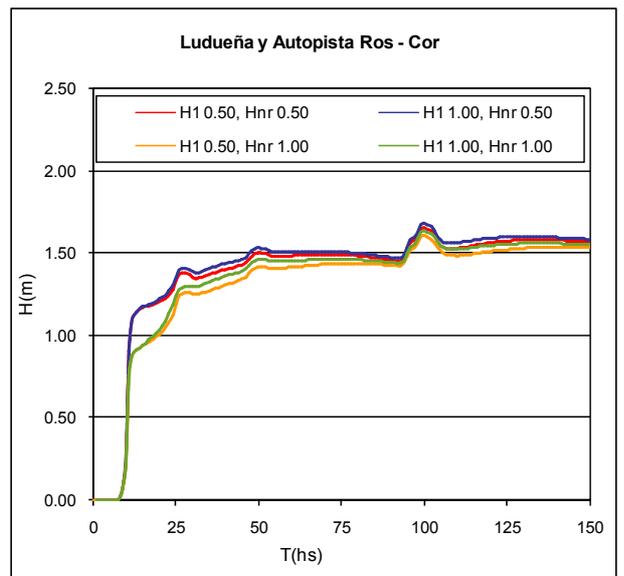
(a1)



(a2)

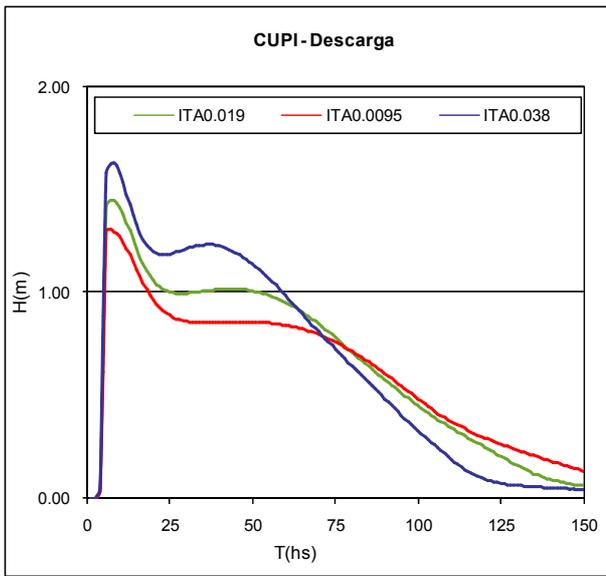


(b1)

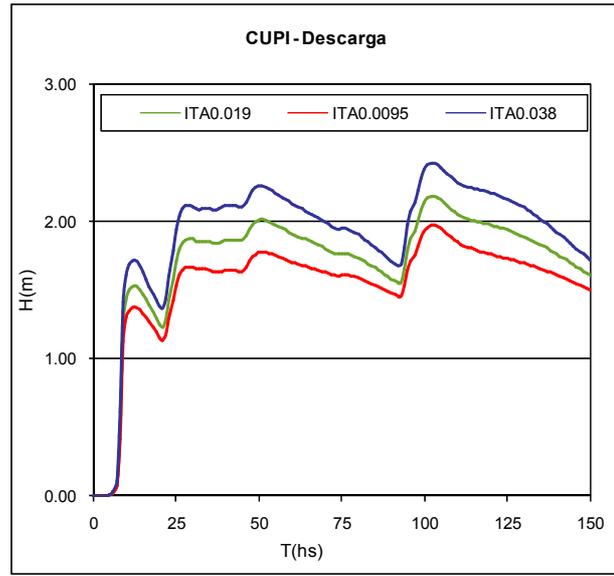


(b2)

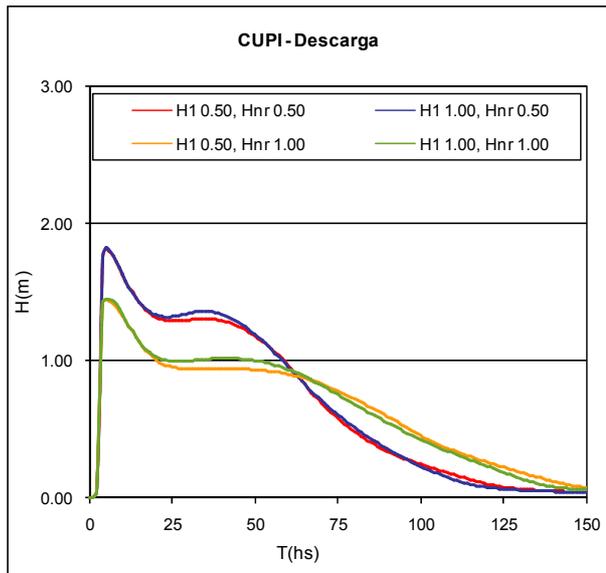
**Figura 20.** Limnigramas en Sitio 7 Ludueña y Puente Autopista Rosario-Córdoba; (a) ITA variable, (a1) tormenta ordinaria, (a2) tormenta extraordinaria; (b) H1, H2 y Hnr variable, (b1) tormenta ordinaria, (b2) tormenta extraordinaria



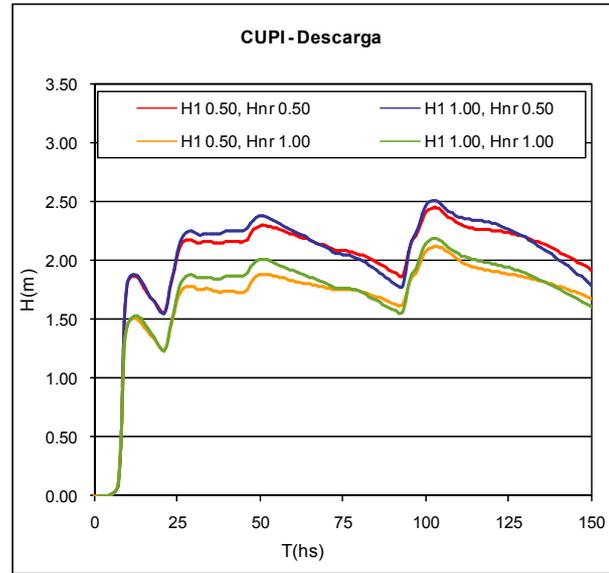
(a1)



(a2)



(b1)



(b2)

**Figura 21.** Limnigramas en Sitio 8 Canal CUPI en descarga al canal Ibarlucea; (a) ITA variable, (a1) tormenta ordinaria, (a2) tormenta extraordinaria; (b) H1, H2 y Hnr variable, (b1) tormenta ordinaria, (b2) tormenta extraordinaria

## ANÁLISIS DE RESULTADOS

### Respuesta en término de niveles

Si se comparan los valores al momento de la presentación de los niveles máximos de todas las alternativas ensayadas con los valores correspondientes a la calibración del modelo H1/H2/Hnr/ITA: 1.00/1.73/1.00/0.0019, las diferencias relativas en niveles son las siguientes:

**Tabla 1.** Diferencias porcentuales en niveles al tiempo de presentación del nivel máximo ITA variando entre 0.0095 a 0.038; H1= 1.00 m; H2 = 1.73 m; Hnr= 1.00 m

Sitios	Lluvia Ordinaria (%)	Lluvia Extraordinaria (%)	Sitios	Lluvia Ordinaria (%)	Lluvia Extraordinaria (%)
1	-20 / +25	-6.5 / +6.7	5	-12.0 / +12.8	- 6.1 / + 6.3
2	-9.8 / +10.	-5.7 / + 6.0	6	- 10.0 / + 11.0	- 5.3 / + 5.2
3	-7.5 / +7.0	-5.2 / + 5.0	7	-3.5 / + 3.2	-2.4 / + 2.3
4	-4.5 / +4.3	-5.7 / + 5.6	8	-10.5 / + 11.5	- 10.2 / +10.6

**Tabla 2.** Diferencias porcentuales en niveles al tiempo de presentación del nivel máximo H1/H2/Hnr/ITA: 0.50/0.63/1.00/0.0019 vs. H1/H2/Hnr/ITA: 1.00/1.73/1.00/0.0019

Sitios	Lluvia Ordinaria (%)	Lluvia Extraordinaria (%)	Sitios	Lluvia Ordinaria (%)	Lluvia Extraordinaria (%)
1	- 2.1	-5.8	5	- 1.7	- 8.5
2	- 1.5	-7.9	6	- 2.1	- 11.5
3	- 4.3	- 3.3	7	-1.0	- 1.8
4	- 3.1	- 4.7	8	- 0.2	- 3.0

**Tabla 3.** Diferencias porcentuales en niveles al tiempo de presentación del nivel máximo H1/H2/Hnr/ITA: 0.50/0.63/0.50/0.0019 vs. H1/H2/Hnr/ITA: 1.00/1.73/1.0/0.0019

Sitios	Lluvia Ordinaria (%)	Lluvia Extraordinaria (%)	Sitios	Lluvia Ordinaria (%)	Lluvia Extraordinaria (%)
1	+ 18.0	+ 1.6	5	+17.8	+ 1.4
2	+ 15.5	+ 1.3	6	+ 16.1	+ 0.7
3	+ 7.6	+ 3.3	7	+ 3.1	+ 1.1
4	+ 22.5	+ 2.6	8	+ 25.73	+ 12.1

**Tabla 4.** Diferencias porcentuales en niveles al tiempo de presentación del nivel máximo H1/H2/Hnr/ITA: 1.00/1.73/0.50/0.0019 vs. H1/H2/Hnr/ITA: 1.00/1.73/1.0/0.0019

Sitios	Lluvia Ordinaria (%)	Lluvia Extraordinaria (%)	Sitios	Lluvia Ordinaria (%)	Lluvia Extraordinaria (%)
1	+ 18.7	+ 8.7	5	+18.8	+ 7.6
2	+ 16.3	+7.1	6	+ 4.6	+7.6
3	+ 11.4	+ 6.3	7	+17.3	+ 2.6
4	+23.3	+ 5.8	8	+ 25.8	+14.6

La tendencia observada cuando se modifica solamente la pendiente transversal ITA es que a menor valor de ITA (0.0095) los niveles descienden con una diferencia máxima del orden del 20% para la simulación de la tormenta ordinaria en tanto que para la tormenta extraordinaria la diferencia se acota al 10.2%.

En lo que concierne a la experimentación con  $ITA = 0.038$  (sección más cerrada) la diferencias son algo mayores, verificándose en este caso niveles por encima del considerado de referencia. Se ha computado un valor de diferencias de niveles hasta del 25% para la tormenta ordinaria y del 10.6% para la tormenta extraordinaria.

Si se realiza un ordenamiento de las alternativas ensayadas variando  $H1$ ,  $H2$  y  $Hnr$  con el valor de  $ITA = 0.0019$  en función de los mayores niveles que deben desarrollarse para la propagación de las crecidas, tanto para el evento ordinario como para el extraordinario el ordenamiento resulta:

- (1)  $H1 = 1.00$  m;  $H2 = 1.73$  m;  $Hnr = 0.50$  m
- (2)  $H1 = 0.50$  m;  $H2 = 0.63$  m;  $Hnr = 0.50$  m
- (3)  $H1 = 1.00$  m;  $H2 = 1.73$  m;  $Hnr = 1.00$  m
- (4)  $H1 = 0.50$  m;  $H2 = 0.63$  m;  $Hnr = 1.00$  m

Se constata que cuando se modifican parámetros geométricos de la sección como  $H1$  y  $H2$ , sin modificar  $ITA$  ni  $Hnr$ , la variante  $H1 = 0.50$  m;  $H2 = 0.63$  m se computa niveles inferiores a los considerados de referencia. Esta diferencia por defecto se acota en 4.3% para la lluvia ordinaria y es del 11.5% en el caso de la lluvia extraordinaria.

Por otro lado al modificar el valor de  $Hnr$  de  $1.00\text{m} \rightarrow 0.50$  m, representando un efecto algo similar a “cerrar” la sección para una cota de agua dada, los niveles calculados son superiores a los de referencia. Este aumento se acota en 25.8% en el caso de la crecida ordinaria y en el orden de 14.6% cuando se simula la crecida extraordinaria.

### **Respuesta en término de caudales**

Si bien no se presentan en este trabajo, la respuesta hidrológica en términos de caudales manifiesta la misma tendencia que en el caso de las variaciones de niveles, ante la variación de los diferentes parámetros  $ITA$ ,  $H1$ ,  $H2$  y  $Hnr$ . En general se constata que la respuesta en términos de caudales, se amplifica respecto a las diferencias calculadas para el caso de niveles.

Tanto en lo concerniente a niveles como a caudales, es claro que, al tratarse de simulaciones con igual volumen de escurrimiento en cada lluvia, las tendencias de niveles y caudales se invierten en lo que denomina la cola de los limnigramas e hidrogramas de modo tal que, al integrar los hidrogramas salientes, se halla como resultado el mismo volumen de escurrimiento.

### **Respecto a la celeridad de la onda de crecida**

Dado que se observan respuestas que involucran diferencias positivas (por exceso) y negativas (por defecto) tanto en niveles como en caudales, respecto a la alternativa de referencia, se verifica que, en los casos de secciones “mas cerradas” para una misma cota de agua, ya sea por aumento de  $ITA$ , o por disminución de la altura de referencia, la celeridad de la onda aumenta. Este mecanismo se evidencia con mayor intensidad en los sitios en los cuales tiene mayor influencia la presa de retención de crecidas, como en el caso del sitio 3, 7, y 4.

## CONCLUSIONES

Se ha presentado un análisis de sensibilidad de la respuesta hidrológica en términos de niveles y caudales ante la proposición de una serie de funciones de almacenamiento para las celdas integrantes del valle tributario del sistema hídrico. Las FAV fueron definidas a partir de funciones ya utilizadas en modelaciones antecedentes en un ambiente de modelación de la región del gran Rosario con relieve predominante de llanura.

La abstracción de la función de almacenamiento estudiada está conformada por una cruz de conectividad con secciones transversales iguales en direcciones ortogonales y con sección trapezoidal compuesta. Se estudió la sensibilidad ante la variación de los parámetros ITA, H1, H2 y Hnr. El parámetro ancho mínimo se consideró despreciable. El grupo de parámetros utilizados como referencia para el análisis de sensibilidad fue ITA = 0.019, H1= 1.0 m, H2= 1.73 m. y Hnr = 1.0 m, determinado a partir de calibraciones realizadas en modelaciones antecedentes.

El análisis de sensibilidad cuando el valor de ITA se reduce a la mitad (ITA = 0.0095) ( la sección transversal se “abre”) del correspondiente a la calibración, indica que los niveles descienden hasta un 25% dependiendo del emplazamiento y del tipo de tormenta. Por otro lado pueden ascender hasta un 20% cuando la sección se “cierra” a valores de ITA = 0.038. Esta sensibilidad se reduce en la medida que la crecida es de mayores características en términos de volúmenes y tiempo de permanencia.

En el caso de modificación de las alturas características de la sección H1 y H2, las diferencias de niveles se acotan en un 11.5% por defecto cuando H1 y H2 son inferiores a los considerados de referencia. El efecto de disminuir H1 y H2 (considerando un mismo Hnr) es equivalente a “abrir” la sección o disminuir el ITA.

La disminución de la altura Hnr ha representado en términos de diferencias de niveles y caudales un efecto similar al aumento del ITA. El aumento máximo verificado en niveles es del orden del 25% cuando Hnr pasa de 1.00 m a 0.50 m. Téngase en cuenta que Hnr representa la profundización de la sección respecto a la cota de fondo media de cada celda, por lo que una disminución de Hnr equivale a cerrar la sección si se considera el volumen para un dada cota de agua. En el presente estudio no fueron considerados Hnr > 1.00 m debido a que, en las celdas tributarias del valle de la cuenca en estudio, no se advierten en ningún caso depresiones o zanjonos con esas profundidades y que no sean consideradas como celdas constitutivas de cursos de agua.

Si bien en la sección de control no se han evidenciado alteraciones significativas en los tiempos de presentación de los niveles y caudales máximos, al producirse aumento de niveles también se verifican aumentos de las velocidades de escurrimiento y por consiguiente aumento de las celeridades de propagación de la onda de crecida. Este mecanismo se verifica con mayor magnitud en la sección de salida de la presa de retención de crecidas.

Es objeto de futuras investigaciones contrastar los valores aquí presentados con resultados obtenidos en otras cuencas, como así también el mejoramiento de las relaciones vinculantes entre las características morfológicas del relieve y del microrelieve de cada celda y los parámetros geométricos aquí planteados para la abstracción asumida para las funciones de almacenamiento FAV y su variación espacial dentro de un mismo sistema hídrico.

## BIBLIOGRAFÍA

- Chow, V.T., Maidment, D.R. and Ways, L.M.** (1987) *Hidrología Aplicada*, Mac Graw-Hill, Bogotá
- Cunge, J.** (1975) *Two Dimensional Modelling of Flood Plains* Cap. 17 *Unsteady flow in open channels* (Ed. Mahmood K. and Yevjevich V.) Water Resources Publications, Fort Collins
- Riccardi, G.** (2000) *“Un sistema de simulación hidrológica-hidráulica cuasi-2D multicapa para ambientes rurales y urbanos”*. XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Tomo II, Córdoba, Argentina, 159-168.
- Riccardi G., Zimmermann E., Basile P., Stenta H., Scuderi C., Garcia M. y Rentería J.** , (2008), *“Implementación de Un Modelo De Escurrimiento Superficial en Cuencas del Sur de la provincia De Santa Fe, Argentina”*. XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Cartagena de Indias, Colombia. 15 pags.
- Riccardi G., Zimmermann E., Basile P., Stenta H., Scuderi C., Rentería J. y Odicini L.**, (2009), *“Aspectos metodológicos para la definición de crecidas de diseño en cuencas de la región del gran Rosario”*. XXII Congreso Nacional del Agua, Trelew, Chubut. 12 pags.
- Riccardi G., Zimmermann E., Basile P., Stenta H., Scuderi C., Rentería J. Odicini L.**, (2010), *“La simulación físicamente basada de escurrimiento superficial como herramienta de pronósticos de niveles en sistemas de alerta hidrológico en zonas de llanura”*. 1er. Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras, Azul. 8 pags.
- Stenta H., y Riccardi G.**, (2005) *“La modificación de la respuesta hidrológica en cuencas de llanura ante la variación del tamaño de la grilla”*. XX Congreso Nacional del Agua, Mendoza. 13 pags.
- Stenta H., Riccardi G. y Basile P.** (2007) *“Comparación de respuestas hidrológicas aplicando un modelo matemático distribuido para diferentes tamaño de grilla”*. XXI Congreso Nacional del Agua, San Miguel de Tucumán. 14 pags.