

# Determinación de la Función de Almacenamiento a nivel de Celda para su Utilización en la Modelación Matemática del Esguerrimiento Superficial

*Hernán Stenta<sup>1,2</sup>, Gerardo Riccardi<sup>1,2,3</sup>, Pedro Basile<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> Departamento de Hidráulica – Escuela de Ingeniería Civil (FCEIA – Universidad Nacional de Rosario). Riobamba 245 bis. (2000) Rosario. Argentina

<sup>2</sup> Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales (FCEIA – Universidad Nacional de Rosario) Riobamba 245 bis. (2000) Rosario. Argentina.

<sup>3</sup> Consejo de Investigaciones de la Universidad Nacional de Rosario. Riobamba 245 bis. (2000) Rosario. Argentina.

Mail de contacto: [hstenta@fceia.unr.edu.ar](mailto:hstenta@fceia.unr.edu.ar)

## RESUMEN

Se presenta una metodología para la obtención de la función de almacenamiento y conducción (FAC) a nivel de celda para un modelo matemático distribuido, cuasi-bidimensional basado en esquemas de celdas. La FAC resulta determinante en el proceso de transformación lluvia-caudal y de propagación de crecidas en modelos físicamente basados y para la obtención de variables de flujo (alturas de agua y velocidades). En una primera etapa se realiza la comparación entre las curvas de distribución de frecuencia acumulada adimensionalizada de altura vs. área superficial obtenidas mediante relevamientos topográficos de detalle (a nivel de subcelda) y obtenidas mediante el modelo digital del terreno para la discretización adoptada (ventana de 3 x 3 celdas del modelo). Se observa un adecuado grado de similitud entre los dos niveles de detalle por lo que en la segunda etapa se realiza la obtención de los parámetros de la ecuación utilizada que vincula altura vs. área superficial; lo que permite obtener la FAC en cada celda del modelo. La metodología permite incorporar la variabilidad espacial de la FAC en todo el dominio espacial de modelación. En investigaciones futuras se incorporará la FAC en cada celda; se simularán eventos observados y se compararán los resultados.

**Palabras clave:** función de almacenamiento y conducción, relevamientos de detalle, modelación matemática distribuida, cuencas de llanura.

## ABSTRACT

A methodology for obtaining the storage – discharge function (SDF) at the cell level for a physically-based and spatially-distributed quasi-2D mathematical model is presented. The SDF controls the process of rainfall-runoff transformation and flow propagation in physically based mathematical models and define the hydraulic flow variables such as water depth and velocity. Firstly a comparison of the dimensionless curves of cumulative frequency distribution of depth vs surface area is performed. At subcell level the curve is obtained by detailed topographic surveys and at model resolutions the curve is obtained by the digital terrain model ( window of 3 x 3 cells in the model). A suitable degree of similarity between the two levels of detail is achieved. In a second stage, the parameters of the equation depth vs surface area at model resolutions are obtained, which allows the definition of the SDF in each cell of the model. The methodology allows the definitions of the SDF throughout the entire spatial domain modeling. In future research will be incorporated the SDF in each cell-model; observed events will be simulated and the results will be compared.

**Keywords:** storage-discharge function, detailed topographic surveys, distributed mathematical modeling, flatland watersheds.

# 1 INTRODUCCIÓN

Los modelos de parámetros distribuidos intentan cuantificar la variabilidad hidrológica que ocurre en un rango de escalas; por medio de la división de la cuenca en un número de unidades. Estas unidades son llamadas de diferentes formas: unidades de respuesta hidrológica; subcuencas o celdas (Blöschl y Sivapalan, 1995). En tal aproximación, los procesos con una longitud de escala menor que el tamaño de la grilla son representados implícitamente (parametrizados) mientras que los procesos con longitudes de escala mayores que el tamaño de la grilla son representados explícitamente a través de las variaciones entre las diferentes celdas que componen la cuenca (Smagorinsky, 1974 citado en Blöschl y Sivapalan, 1995).

La representación de procesos dentro de una unidad (celda) debe involucrar: a) la descripción del fenómeno a nivel de escala local y b) alguna hipótesis de variabilidad dentro de la unidad. En general los modelos de parámetros distribuidos representan fenómenos locales con considerable detalle; mientras que la variabilidad dentro de la celda es despreciada (Blöschl y Sivapalan, 1995).

Diferentes aproximaciones pueden ser establecidas para cuantificar la variabilidad de procesos hidrológicos dentro de una celda. Una de ellas asume que los parámetros y los procesos son uniformes dentro de cada celda y que la descripción de escala pequeña se aplica a la celda entera. Otra aproximación es la de incorporar dentro de la celda funciones de distribución de los parámetros en lugar de utilizar valores únicos. Por último, una tercera aproximación es la de parametrizar la variabilidad dentro de la celda sin acudir a la definición explícita de las ecuaciones locales (Blöschl y Sivapalan, 1995).

Muchos autores reconocen la importancia de la variabilidad topográfica dentro de una unidad de discretización en lo que respeta a los efectos sobre el almacenamiento temporario y la propagación de crecidas. También se reconoce que dentro de las celdas o unidades de discretización (para modelos de mesoescala) se debe contemplar alguna abstracción del mecanismo de almacenamiento que se considere, por ejemplo, alguna variación del área superficial inundada como función de la altura incorporando los efectos de los microcanales, surcos, pequeños bajos, etc. En forma general, la celda no se encuentra completamente "inundada" para tirantes de agua pequeños (Moore y Burch, 1986; Defina, 2000; Panday y Huyakorn, 2004; Pedraza, 2006).

La caracterización de la variabilidad de la morfología y de procesos dentro de cada unidad espacial de discretización es de suma importancia en el modelado hidrológico distribuido físicamente basado. Se plantea entonces que una adecuada representación, a nivel de cada unidad espacial (celda), de la relación entre la altura de agua, el área superficial y transversal mojada y el volumen almacenado (función FAC) es determinante en el mecanismo de propagación o tránsito de crecida. De lo anterior es posible obtener variables de flujo tales como niveles y velocidades de una manera realista. A su vez estas variables hidráulicas intervienen, por ejemplo, en aplicaciones destinadas a la delimitación de áreas inundadas o en el estudio del transporte y depósito de contaminantes y sedimentos (Stenta, 2008).

Trabajos de Moore y Burch (1986), Panday y Huyakorn (2004), Woolhiser et al. (1996) proponen diferentes abstracciones para representar la relación entre altura de agua en la unidad de discretización y el volumen almacenado. Hayashi y van der Kamp (2000) proponen una función analítica de tipo potencial que relaciona altura de agua y área superficial (H-A) y altura de agua y volumen almacenado (H-V) para representar almacenamientos en pequeños lagos, humedales y bajos o pozos. La función potencial propuesta está formada por la rotación de un perfil transversal alrededor de un eje vertical central (volumen de revolución). En todos los casos se requieren relevamientos topográficos de detalle de forma de contar con información adecuada que permita ajustar la FAC propuesta.

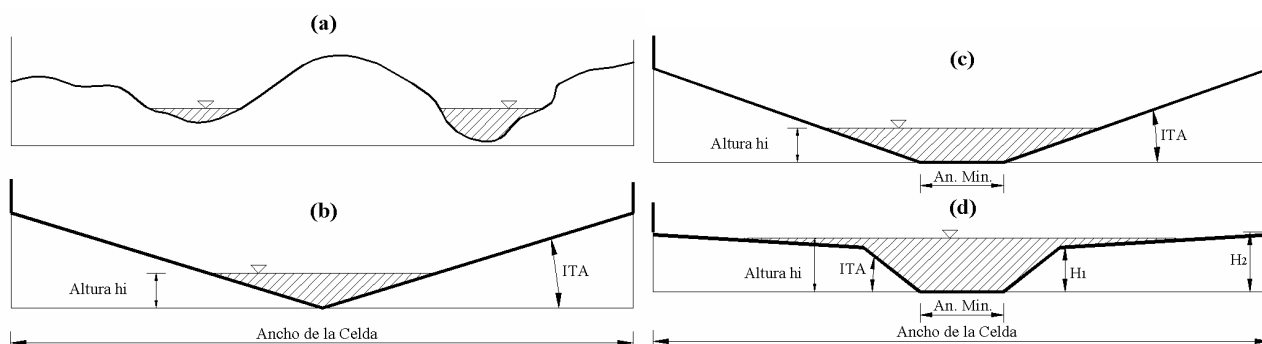
El objetivo general del presente trabajo es la implementación de una metodología basada en información topográfica de detalle para la obtención de los parámetros a nivel de celda para la definición de la función de almacenamiento y conducción dentro de la misma para ser incorporada al modelo matemático hidrológico-hidráulico cuasi-bidimensional de parámetros distribuidos denominado CTSS8 (Riccardi, 2001). El sistema de modelación está ampliamente probado y se

han obtenido resultados satisfactorios en cuencas y sistemas fluviales de la región (Stenta et al., 2009; Riccardi et al., 2010; Basile et al., 2010).

El modelo CTSS8 está basado en el esquema de celdas interconectadas originalmente propuesto por Cunge (1975). 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.

El modelo conceptual de almacenamiento en celda utilizado por el modelo hidrológico-hidráulico CTSS8 para representar la variabilidad del relieve dentro de la celda (Fig. 1.a) se planteó originalmente como cruz de conectividad con sección transversal triangular donde la variable geométrica de la sección es el talud lateral (Fig. 1.b). En posteriores avances (Riccardi et al., 2008) corroboraron la abstracción de la sección transversal incorporándose el concepto de ancho mínimo, lo que transforma la sección de triangular en trapezoidal (Fig. 1.c). Por otro lado Stenta (2008) realizó trabajos de escalado de tal variable geométrica de la sección transversal cuando se cambia de tamaño la grilla cuadrangular de discretización. En trabajos posteriores (Odicini et al., 2011; Riccardi et al., 2013) plantearon una sección compuesta para la definición de la FAC (Fig. 1.d). Respecto a la variabilidad espacial dentro del dominio de la cuenca debe indicarse que hasta la fecha la función del almacenamiento utilizada por el modelo CTSS8 es constante en todo el dominio.

Dentro de las ecuaciones gobernantes del modelo matemático CTSS8, la FAC interviene en la ecuación de continuidad mediante la definición del área superficial para una determinada altura de agua dentro de la celda y a su vez permite el cálculo del volumen almacenado. Para el cálculo del caudal pasante y de la velocidad media entre celdas la FAC interviene mediante la definición del área transversal mojada a partir del conocimiento del tirante de agua.



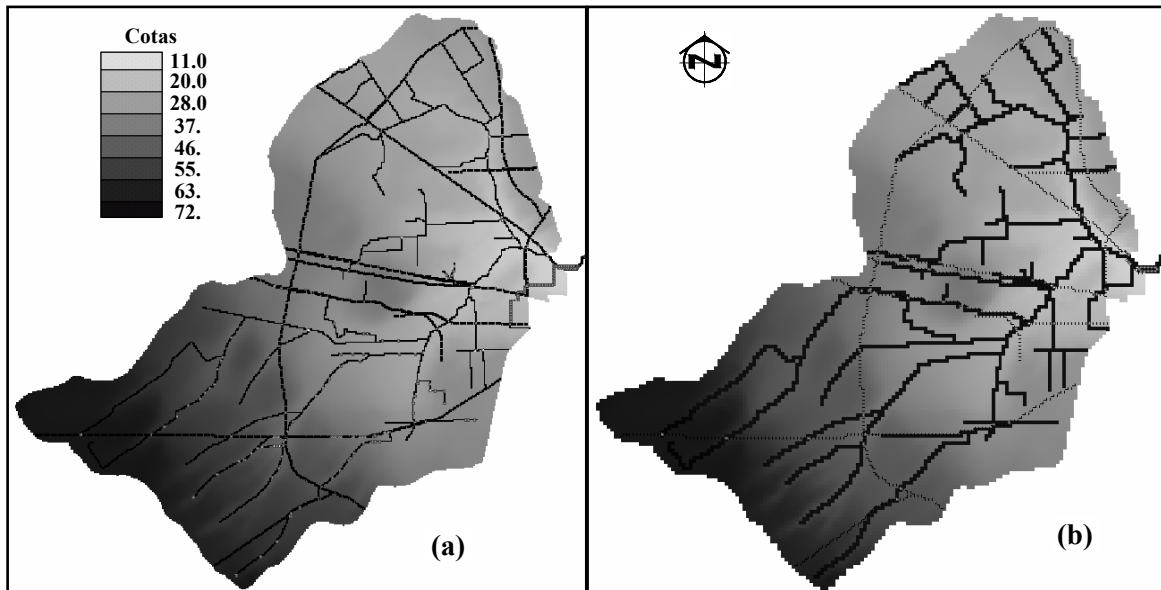
**Figura 1** – (a) Relieve dentro de la celda y (b), (c), (d) diferentes formas de la FAC dentro de la celda

## 2 MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Cuenca en estudio

El trabajo se realizó dentro de la cuenca del A° Ludueña, Santa Fe, Argentina (Fig. 2). La misma se encuentra situada entre los paralelos 32° 45' S y 33° 08' S y los meridianos 61° 04' O y 60° 39' O. El área de aporte es de 740 Km<sup>2</sup> y la elevación varía entre 71.5 m y 16 m sobre el nivel del mar. Su pendiente media es del orden del 0.11 %. La región se encuentra atravesada por importantes terraplenes tanto viales como ferroviarios. El balance hidrológico medio anual a partir de 1973 se compone de una precipitación anual de 967 mm/año, una evapotranspiración de 923 mm/año con un excedente de 44 mm/año. El caudal base del arroyo es de 0,50 m<sup>3</sup>/s, en tanto que en crecidas ordinarias se alcanzan los 80 m<sup>3</sup>/s y en extraordinarias (R > 50 años) caudales superiores a 400 m<sup>3</sup>/s (Riccardi et al., 2002).

En el presente trabajo se utilizaron dos discretizaciones del dominio espacial de la cuenca, subdividido con grilla cuadrangular de 100 m de lado (TG100 – Fig. 2.a; Odicini, 2011) y 250 m de lado (TG250 – Fig. 2.b, Stenta, 2010). Las principales características de dichas discretizaciones son para TG100: 74039 celdas y 147175 vinculaciones entre celdas y para TG250: 11855 celdas y 23349 vinculaciones entre celdas.



**Figura 2** - Discretización de la cuenca del A° Ludueña para tamaño de grilla (TG), a) TG100; b) TG250

## 2.2 Relevamientos topográficos de detalle.

Se contó con relevamientos topográficos de detalle diferentes sectores ubicados dentro de la cuenca en estudio. Las superficies relevadas se encuentran entre 69 y 415 has; la cantidad de puntos dentro de las superficies relevadas varía entre 196 y 4811 y se tiene una cantidad de puntos por hectárea variable entre 2.4 y 17.3.

## 2.3 Descripción de la función FAC

La forma para la representación de la relación altura-área-volumen se expresa mediante la ecuación propuesta por Hayashi y van der Kamp (2000):

$$A_{\text{sup}}(h_i) = s \times \left( \frac{h_i}{h_{\text{max}}} \right)^{1/p} \quad (1)$$

Donde  $A_{\text{sup}}$ : área superficial para la altura  $h_i$ ;  $h_i$ : altura;  $s$  y  $p$ : parámetros;  $h_{\text{max}}$ : altura máxima para la cual  $A_{\text{sup}} = s$ .

La función potencial propuesta está formada por la rotación de un perfil transversal alrededor de un eje vertical central (volumen de revolución). Vista en planta, el área superficial es de forma circular. En forma gráfica, dicha ecuación se representa dentro de la celda según se observa en la Fig. 3. El parámetro  $s$  representa la dimensión del área superficial para la altura máxima y el parámetro  $p$  es un indicador de la forma del perfil transversal. A medida que  $p$  se incrementa el perfil transversal tiende a hacerse cada vez más plano; y si  $p$  tiende a infinito la forma de almacenamiento planteada es un cilindro, independiente de la altura de agua.

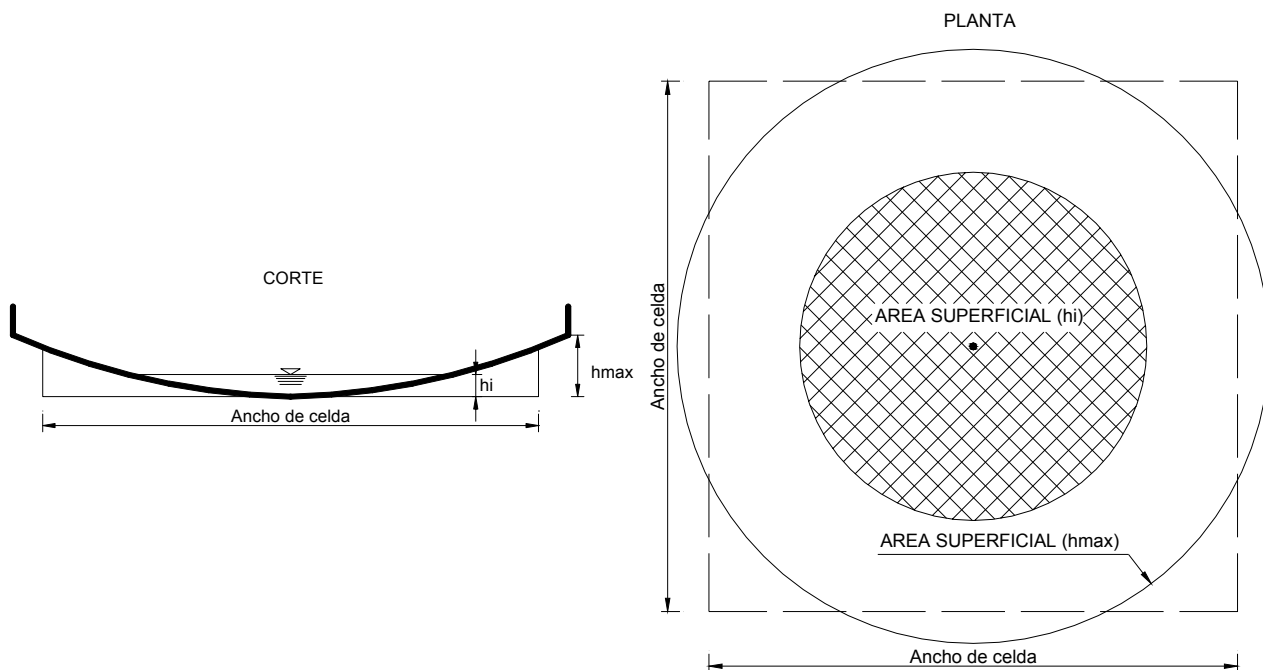
A partir de la determinación de los parámetros de la ec. (1) es posible obtener, en función de la altura  $h_i$ , los valores del área transversal mojada y del volumen almacenado.

## 2.4 Metodología propuesta para la obtención de los parámetros de la relación $A_{\text{sup}}-h_i$

Para la obtención de los parámetros de cada celda para representar la relación entre altura de agua ( $h_i$ ) y área superficial ( $A_{\text{sup}}$ ) se realizaron dos pasos bien diferenciados:

Paso 1).

El objetivo principal de este paso es la cuantificación del grado de similitud entre la relación  $h_i-A_{\text{sup}}$  a nivel de subcelda  $[h_i-A_{\text{sup}}]_{\text{subcelda}}$  (obtenida a partir de las cotas de los relevamientos de detalle) y la relación  $h_i-A_{\text{sup}}$  obtenida a partir de las cotas resultantes de la discretización adoptada de la cuenca  $[h_i-A_{\text{sup}}]_{\text{TG}}$  (en este estudio, para TG100 y TG250). La cuantificación del grado de similitud se realiza a partir de la comparación de las curvas de distribución de frecuencias acumuladas adimensionalizadas (DFAa) de las relaciones  $[h_i-A_{\text{sup}}]_{\text{subcelda}}$  y  $[h_i-A_{\text{sup}}]_{\text{TG}}$ .



**Figura 3** - FAC en celda. Adaptado de Hayashi y van der Kamp (2000) para al modelo matemático CTSS8

Para cada celda del modelo discretizado (TG100 y TG250) donde se contaba con relevamientos de detalle se realizó la interpolación a partir de la base de datos original en formato irregular (mediante la técnica de kriging) para obtener una base de datos interpolada en forma regular, con un espaciado equidistante de 25 m. Esta densidad de puntos (16 puntos por hectárea en forma equiespaciada) se adoptó considerando que en función de los datos originales de partida (los relevamientos de detalle) se cuenta con un valor máximo de 17.3 puntos por hectárea. Al trabajar con la discretización TG100 se tienen 16 valores de cotas equiespaciadas obtenidas mediante interpolación de la base de datos original y al trabajar con TG250 se obtienen 100 valores de cotas. Con los valores de cotas equiespaciados a nivel de subcelda se obtiene la curva de distribución de frecuencia acumulada adimensionalizada de alturas vs. áreas superficiales a nivel de subcelda; DFAa  $[h_i-A_{sup}]_{subcelda}$ . Los valores de cotas y áreas superficiales se adimensionalizan respecto a los valores máximos de cotas y áreas superficiales, respectivamente.

Para la construcción de la curva de distribución de frecuencia acumulada adimensionalizada de alturas vs. áreas superficiales para la discretización adoptada; DFAa  $[h_i-A_{sup}]_{TG}$ , se utilizaron 9 cotas de celdas, que corresponden a la celda central y las restantes 8 celdas vecinas (ventana de 3 celdas x 3 celdas).

Para cuantificar el grado de ajuste entre la DFAa  $[h_i-A_{sup}]_{subcelda}$  y DFAa  $[h_i-A_{sup}]_{TG}$ , se utilizó el coeficiente  $RN^2$  (adaptación del coeficiente presentado en Nash y Sutcliffe, 1970) (ec. 2) y el coeficiente de determinación  $R^2$ . En ambas curvas de DFAa se consideraron 9 intervalos de cotas; y sus respectivos valores de área superficial.

$$RN^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (A_{sup}^i_{subcelda} - \overline{A_{sup}_{subcelda}})^2 - \sum_{i=1}^n (A_{sup}^i_{subcelda} - A_{sup}^i_{TG})^2}{\sum_{i=1}^n (A_{sup}^i_{subcelda} - \overline{A_{sup}_{subcelda}})^2} \quad (2)$$

Donde:  $A_{sup}^i_{subcelda}$  = área superficial adimensionalizada para el intervalo i, a nivel de subcelda,  
 $\overline{A_{sup}_{subcelda}}$  = promedio de los valores del área superficial adimensionalizada a nivel de subcelda,  
 $A_{sup}^i_{TG}$  = área superficial adimensionalizada para el intervalo i, para la discretización adoptada (TG100 y TG250) y n = cantidad de intervalos.

La comparación entre curvas de DFAa se realiza para todas las celdas del modelo donde se cuenta con información de relevamiento de detalle. Para la discretización de TG100 se obtuvieron

1464 pares de curvas y para TG250 se obtuvieron 133 pares de curvas. Por cada par de curvas se obtienen los coeficientes para cuantificar el grado de ajuste ( $RN^2$  y  $R^2$ ).

Un resultado aceptable del ajuste entre las curvas de DFAa indica que existe similitud en la relación entre alturas y áreas superficiales a nivel de subcelda y a nivel de la discretización adoptada (TG100 y TG250). De esta forma es posible plantear una relación entre alturas y área superficial para cada celda del modelo a partir de la cota de la celda en estudio y las restantes 8 celdas vecinas (para cada discretización). Lo anterior permite obtener una curva por cada celda del modelo; es decir, en todo el dominio espacial, ya que no es posible contar con relevamientos de detalle en toda la cuenca. Por lo tanto, la determinación de la relación entre altura y área superficial en cada celda del modelo se obtiene a partir del MDT de la discretización adoptada.

Paso 2).

El objetivo de este paso es la determinación de los parámetros de la ec. (1) y la cuantificación del grado de ajuste entre la curva de DFA de altura vs. áreas superficiales obtenida a partir del MDT de la discretización adoptada y la ec. (1).

En la ec. (1), el área superficial es de forma circular para cualquier altura  $h_i$ . En dicha ecuación, para un valor de altura  $h_i$  igual a la altura máxima ( $h_{max}$ ), el área superficial es igual al parámetro  $s$ . Por lo tanto, para un determinado tamaño de grilla, TG, el valor del parámetro  $s$  para una altura igual a  $h_{max}$  es:  $s = TG \times TG$ .

La determinación de la altura máxima ( $h_{max}$ ) dentro de la celda se obtuvo como el producto de la pendiente local de la celda ( $S$ ) y la longitud  $L$  de afectación de dicha pendiente dentro de la celda. En el cálculo de  $S$  y  $L$  intervienen los valores de las celdas vecinas y el TG.

De esta forma el parámetro a determinar en la ec. (1) es el exponente  $p$ ; siendo  $h_i$  la variable independiente. El valor de  $s$  resulta  $TG \times TG$  y el valor de  $h_{max}$  se obtiene en función de las cotas de las celdas vecinas y del TG.

Conociendo la curva de DFA de altura vs. área superficial obtenida de la discretización a partir de los valores de cotas de las 9 celdas formadas por la ventana de  $3 \times 3$  celdas y utilizando el método de los mínimos cuadrados se obtuvo el valor del parámetro  $p$  de la ec. (1) en cada celda del modelo que permite el ajuste entre las curvas de DFA altura vs. área superficial.

Para cuantificar el ajuste alcanzado entre las curvas de DFA de alturas vs. área superficial obtenidas a partir de la discretización y mediante la expresión analítica (ec. 1) se utilizaron los coeficientes  $RN^2$  y  $R^2$ .

De esta forma se obtienen los parámetros  $h_{max}$  y  $p$  en todo el dominio espacial de modelación. Estos parámetros forman parte de los datos de entrada al modelo para realizar las diferentes simulaciones.

El conocimiento de los valores de los parámetros  $p$  y  $h_{max}$  en cada celda; utilizando la ec. (1) permite obtener en forma explícita el área transversal de escurrimiento en función de la altura de agua. De esta forma es posible calcular las variables hidráulicas velocidad media y caudal pasante entre celdas a partir de un valor de altura de agua en las celdas vinculadas.

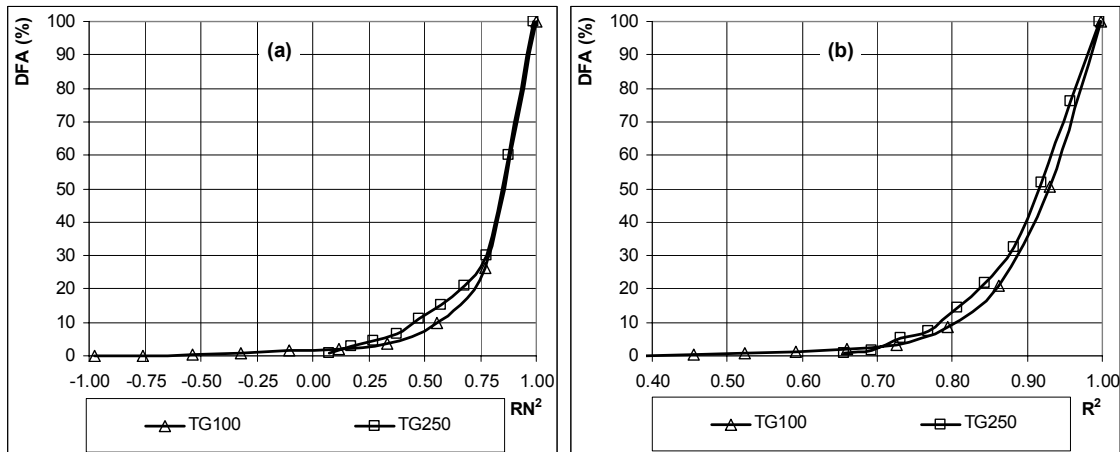
Asimismo, el volumen almacenado para un valor de altura de agua dado en la celda se obtiene mediante la relación altura vs. área superficial y las variaciones de altura.

### **3 ANÁLISIS DE RESULTADOS**

#### **3.1 Respecto a la relación entre altura de agua y área superficial a nivel de subcelda y a nivel de discretización (Paso 1).**

A partir de la aplicación del primer paso descrito anteriormente se obtuvieron los valores de los coeficientes  $RN^2$  (ec. 2) y  $R^2$  que cuantifican el grado de ajuste entre las curvas de DFA adimensionalizada de altura de agua vs. área superficial a nivel de subcelda y a nivel de discretización para TG100 y TG250.

En la Fig. 4 se muestran, en términos de distribución de frecuencia acumulada, los resultados obtenidos de los coeficientes  $RN^2$  y  $R^2$  para las discretizaciones TG100 y TG250.



**Figura 4** - Comparación entre curvas de DFA adimensionalizada de altura de agua vs. área superficial a nivel de subcelda y a nivel de discretización TG100 y TG250: a) Coeficiente  $RN^2$  y b) Coeficiente  $R^2$ .

Se observa que si bien existen valores reducidos de los coeficientes  $RN^2$  y  $R^2$ , por ejemplo - 0.98 ( $RN^2$  - TG100) y 0.39 ( $R^2$  - TG100), los mismos tienen un valor porcentual reducido respecto a todos los valores de los coeficientes obtenidos.

Respecto al parámetro  $RN^2$  se obtienen valores superiores a 0.75 en un 76 % del total de los valores del coeficiente para TG100; y para el coeficiente  $R^2$  se obtienen valores superiores a 0.75 en un 96 % del total de valores obtenidos.

Para TG250 los resultados indican que los valores superiores a 0.75 se alcanzan en un 74 % del total de los valores para el coeficiente  $RN^2$  y en un 93 % para el coeficiente  $R^2$ .

Los resultados obtenidos se consideran aceptables, por lo tanto es posible indicar que existe similitud en términos de la relación adimensional entre altura de agua y área superficial a nivel de subcelda (obtenida a partir de relevamientos topográficos de detalle) y a nivel de discretización (esquema agregado).

Respecto a los resultados de los coeficientes  $RN^2$  y  $R^2$  para las dos discretizaciones consideradas (TG100 y TG250) es posible indicar que no se observaron diferencias importantes.

### 3.2 Respecto a la relación entre altura de agua y área superficial a nivel de discretización y mediante formulación explícita (Paso 2).

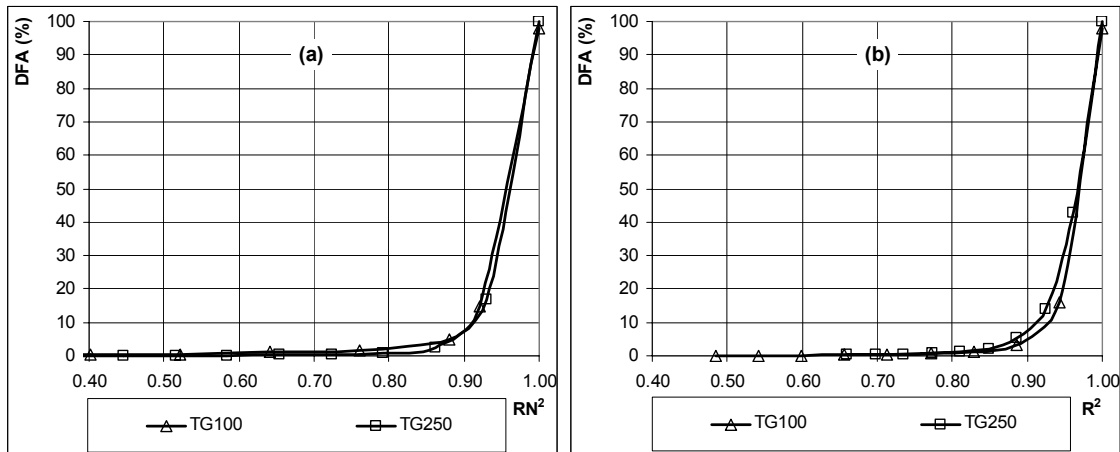
A partir de los resultados alcanzados en el Paso 1, que a los fines de este trabajo se consideran satisfactorios; es posible avanzar respecto a la determinación de los parámetros de la ec. (1) para cada celda del modelo; asumiendo que en todo el dominio espacial la relación entre altura de agua y área superficial es posible obtenerla a partir de la discretización adoptada (9 celdas) sin la necesidad de contar con relevamientos de detalle a nivel de subcelda en toda la cuenca.

La aplicación del Paso 2, en todo el dominio de la cuenca, permite obtener los parámetros de la ec. (1) y cuantificar en grado de ajuste de la relación entre la altura de agua y el área superficial entre la discretización espacial considerada (9 celdas; para TG100 y TG250) y la expresión analítica (ec. 1) mediante los coeficientes  $RN^2$  y  $R^2$ .

Para la discretización TG100 se obtuvieron los parámetros de la ec. (1) en 72339 celdas y para TG250 en 11185 celdas.

La cantidad de celdas donde se obtuvieron los parámetros de la ec. (1) es menor a la cantidad total de celdas de cada discretización debido a las celdas del borde, en las que no se cuenta con las 8 celdas vecinas y por lo tanto no se calcularon los parámetros. A los fines de asignar los parámetros de la ec. (1) a las celdas del borde se adoptó como criterio el de asignar a dichas celdas los parámetros de la celda vecina más próxima.

Los valores de los coeficientes  $RN^2$  y  $R^2$ , para ambas discretizaciones (TG100 y TG250) expresados en términos de distribución de frecuencia acumulada se presentan en la Fig. 5.



**Figura 5** - DFA de los coeficientes  $RN^2$  (5.a) y  $R^2$  (5.b) para TG100 y TG250 obtenidos para el ajuste de la relación altura de agua vs. área superficial entre la discretización (9 celdas) y la expresión analítica (1)

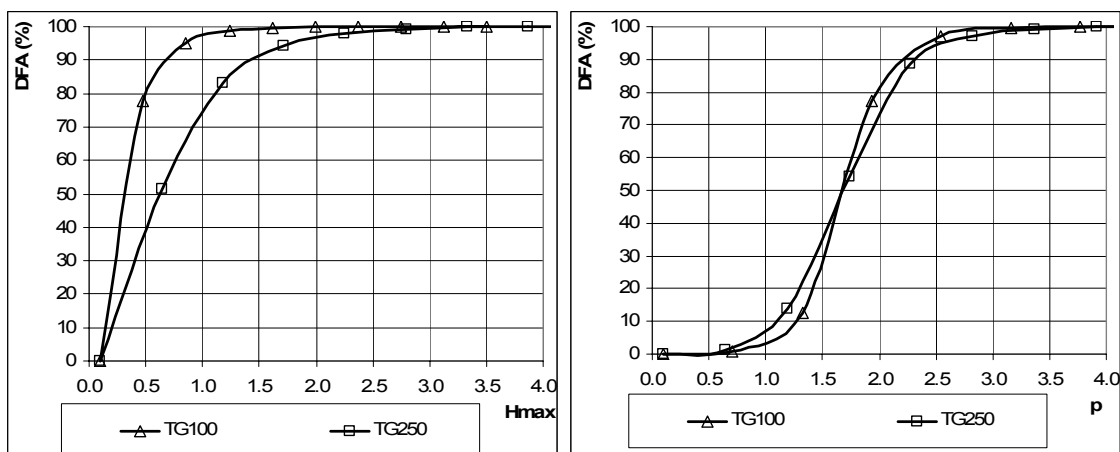
Se observa que se alcanzan resultados adecuados, tanto para el coeficiente  $RN^2$  como para el coeficiente  $R^2$ . Por ejemplo, valores superiores a 0.75 para  $RN^2$  se alcanzan en un 98 % (TG100) y en un 96.5 % (TG250). Para el coeficiente  $R^2$  los resultados del coeficiente mayores a 0.75 son superados en un 98.5 % (TG100) y en un 97 % (TG250).

Los resultados indican que se logra un ajuste adecuado entre la relación experimental altura de agua y área superficial obtenida a partir de la discretización adoptada respecto al planteo analítico de dicha relación presentado en la ec. (1).

Respecto a los parámetros  $h_{max}$  y  $p$  obtenidos en todo el dominio de la cuenca; en la Fig. 6.a se muestra la distribución de frecuencia acumulada del parámetro  $h_{max}$  para TG100 y TG250 y en la Fig. 6.b se muestran los mismos resultados para el parámetro  $p$ .

En la Fig. 6.a se observa que los valores de  $h_{max}$  comprendidos entre el 5 % y el 95 % se encuentran entre 0.12 m y 0.86 m (TG100) y entre 0.15 m y 1.75 m (TG250).

Respecto al parámetro  $p$ , los valores comprendidos entre el 5 % y el 95 % se encuentran entre 1.05 y 2.30 (TG100) y entre 0.85 y 2.60 (TG250).



**Figura 6** - DFA para TG100 y TG250 del parámetro: a)  $h_{max}$  y b)  $p$  (ec. (1)) en todo el dominio de la cuenca.

#### 4 CONCLUSIONES

Este trabajo constituye un primer nivel de avance respecto a la definición de la FAC en todo el dominio espacial de la cuenca hidrográfica y estudios posteriores estarán orientados a la simulación mediante el modelo CTSS8 de una serie de eventos observados con la finalidad de



comparar los resultados obtenidos en términos de niveles de agua, caudales y áreas anegadas, contando con información pluviométrica, limnimétrica e imágenes satelitales registrada en diferentes eventos.

Se remarca la importancia, para modelos basados físicamente, de la definición de la relación entre altura de agua, área superficial, área transversal mojada y volumen almacenado en cada unidad de discretización espacial. La definición de estas relaciones, variable en todo el dominio de modelación, permite obtener variables hidráulicas tales como alturas de agua y velocidades de flujo de forma realista.

La metodología propuesta para la obtención de la relación entre altura de agua y área superficial presenta como avance la definición de la variabilidad espacial en todo el dominio de modelación de dicha relación utilizando como información principal el modelo digital del terreno.

Se observó un adecuado grado de ajuste de las curvas de DFA adimensionalizada de altura de agua vs. área superficial, obtenidas mediante relevamientos de detalle (a nivel de subcelda – alto nivel de detalle) y obtenidas mediante la discretización adoptada.

A partir de los resultados alcanzados en términos de similitud entre ambos niveles de detalle de la topografía y ante la imposibilidad de contar con relevamientos de alto nivel de detalle (a nivel de subcelda) en toda la cuenca es posible obtener la relación entre altura de agua y área superficial para cada celda del modelo a partir de la discretización adoptada.

Se obtuvo un adecuado grado de ajuste (cuantificados mediante los coeficientes  $RN^2$  y  $R^2$ ) entre las curvas de DFA de altura de agua vs. área superficial obtenidas a partir de la discretización adoptada (ventana de 3 x 3 celdas) y la propuesta de ecuación analítica de dicha relación.

La forma analítica de la relación altura de agua y área superficial requiere la determinación de dos parámetros en cada celda del modelo. La obtención de los parámetros depende del tamaño de la celda y del relieve en el entorno de cada celda (definido mediante el modelo digital del terreno).

La forma explícita de la ecuación planteada de altura de agua vs. área superficial, permite conocer en forma explícita la sección transversal al escurrimiento para calcular variables hidráulicas tales como velocidad media y caudal. De igual forma es posible conocer el volumen almacenado en forma explícita para cualquier altura. Estas relaciones son de suma importancia en la modelación matemática del escurrimiento a superficial libre.

Futuras investigaciones estarán orientadas a: 1) ampliar la superficie dentro de la cuenca con relevamientos de detalle para validar los resultados obtenidos en el presente trabajo; 2) la incorporación en el modelo matemático de simulación del escurrimiento superficial de la abstracción propuesta a nivel de celda para vincular altura de agua, área superficial, área transversal y volumen en celda; 3) la simulación de eventos observados para su análisis y comparación respecto a los valores observados, principalmente en términos de niveles en la sección de control y en secciones internas y 4) la elaboración de mapas de zonas anegadas y su análisis y comparación con mapas obtenidos a partir del tratamiento de imágenes satelitales realizados en trabajos anteriores.

Si bien se deben analizar los resultados de la utilización de la relación planteada de altura de agua vs. área superficial en modelaciones de eventos observados, resulta importante remarcar que se incorporó en el presente trabajo la definición de dicha relación en cada celda del modelo (variabilidad espacial).

## 5 REFERENCIAS

- Basile, P.; Riccardi, G.; Zimmermann, E.; Stenta, H. 2010. Simulation Of Erosion-Deposition Processes At Basin Scale By A Physically-Based Mathematical Model. *International Journal of Sediment Research*. The International Research and Training Center on Erosion and Sedimentation and The World Association for Sedimentation and Erosion Research. Vol. 25, N° 2. pp.91-109. ISSN: 1001-6279; Pekin, China.
- Blöschl, G. y Sivapalan, M., 1995. Scale issues in hydrological Modelling: A Review. *Hydrological Processes*.

- Vol. 9, 251-290.
- 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.
- Defina, A. 2000. Two-dimensional shallow flow equations for partially dry areas. *Water Resources Research*, Vol. 36, N° 11, pp 3251–3264.
- Hayashi, M y van der Kamp. G., 2000. Simple equations to represent the volume-area-depth relations of shallow wetlands in small topographic depressions. *Journal of Hydrology*. 237. 74-85.
- Moore, I.D., y Burch, G. J., 1986. Sediment transport capacity of sheet and rill flow: application of unit stream power theory. *Wat. Resour. Res*, 22, 1350-1360.
- Nash, J. and Sutcliffe, J., 1970. River flow forecasting through conceptual models, I-A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10, 282-290.
- Odicini, L., 2011. Mejoramiento de Modelación de Escurrimiento Superficial Orientado al Sistema de Alerta Hidrológico de las Cuencas de Los Arroyos Ludueña y Saladillo. Informe Final. Beca de iniciación en la investigación científica y tecnológica. FCEIA. UNR. 98 pag.
- Odicini, L.; Riccardi, G. y Stenta, H., 2011. Análisis de alternativas de función de almacenamiento en el modelado hidrológico-hidráulico físicamente basado. *XXIII Congreso Nacional del Agua*. Resistencia, Chaco, Argentina. ISSN 1853-7685. 26 pag.
- Panday, S. y Huyakorn, P., 2004. A Fully coupled physically-based spatially-distributed model for evaluating surface/subsurface flow. *Advances in Water Resources*. 27. 361-382.
- Pedraza, R., 2006. Efecto de Escala sobre la simulación del flujo de agua superficial en áreas urbanas usando modelos basados en la onda cinemática. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad de Córdoba.
- Riccardi, G., 2001. Un Sistema de Simulación Hidrológica-Hidráulica cuasi-2D multicapa para ambientes rurales y urbanos. Tesis Doctoral, FCEFYN, UNC, Córdoba. 278 p.
- Riccardi, G.; Scuderi, C. y Stenta, H., 2002. Modelado de Escurrimiento Superficial con Alto Nivel de Detalle en la Cuenca del Arroyo Ludueña, Santa Fe, Argentina. *XIX Congreso Nacional del Agua*, T33, Villa Carlos Paz, Córdoba, Argentina.
- 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. 10 p.
- 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. *Libro de Actas del I Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras*. Eds. Marcelo Varni, Ilda Entraigas y Luis Vives. Editorial Martin. ISBN: 978-987-543-393-9. pp 296-303. Azul, Buenos Aires, Argentina.
- Riccardi, G.; Stenta, H.; Scuderi, C.; Basile, P.; Zimmermann, E.; Trivisonno, F., 2013. Aplicación de un modelo hidrológico-hidráulico para el pronóstico de niveles de agua en tiempo real. *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. IV, núm. 1, pp. 83-105
- Stenta, H., 2008. Efectos del tamaño de grilla sobre la modelación matemática distribuida del escurrimiento superficial en cuencas de llanura. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Rosario.
- Stenta, H.; Riccardi, G.; Navarro, R.; Zimmermann, E.; Postiglione, R.; Basile, P.; Zucca, O.; Zacarías, S., 2009. Aplicación de un Modelo Matemático Distribuido en la Cuenca Del A° Ludueña para diferentes Alternativas de Obras Hidráulicas Orientadas al Saneamiento Hídrico Integral. *XXII Congreso Nacional del Agua*, Trelew, Chubut. 12 p. ISBN 978-987-25369-1-6. Trab. N° 239.
- Stenta, H.; Riccardi, G.; Zimmermann, E.; Basile, P.; Scuderi, C.; Rentería, J.; Odicini, L., 2010. Modelación matemática distribuida del escurrimiento superficial en zona de llanura y su utilización en sistema de alerta contra inundaciones en la Cuenca del A° Ludueña. *Libro de Actas del I Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras*. Eds. Marcelo Varni, Ilda Entraigas y Luis Vives. Editorial Martin. ISBN: 978-987-543-393-9. pp. 889 – 896. Azul, Buenos Aires, Argentina.
- Woolhiser, D. A.; Smith, R. E. y Giradles, J. V., 1996. Effects of spatial variability of saturated hydraulic conductivity on Hortonian overland flow. *Water Resources Research*, vol 32 (3), pp 671-678.