

## **SIMULACIÓN HIDRO-SEDIMENTOLÓGICA A ESCALA DE CUENCA ACOPLANDO UN MODELO HIDROLÓGICO-HIDRÁULICO CON MUSLE**

**Pedro A. Basile<sup>(1),(3)</sup>, Gerardo A. Riccardi<sup>(2),(3)</sup>, Hernán Stenta<sup>(1),(3)</sup> y Erik Zimmermann<sup>(1),(3)</sup>**

<sup>(1)</sup>Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

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

<sup>(3)</sup>Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura - UNR

Riobamba 245 bis, (2000) Rosario, Argentina

Telefax: 0341 4808541. E-mail: pbasile@fceia.unr.edu.ar

### **RESUMEN**

La disgregación de la estructura del suelo por impacto de las gotas de lluvia, la pérdida de suelo debido al transporte ejercido por el flujo sobre el terreno y el consiguiente arrastre de materia orgánica y nutrientes induce un efecto neto de pérdida de productividad en terrenos cultivables. Por otra parte, además de este problema local, el sedimento producido y transportado por el flujo sobre el terreno puede alcanzar la red hidrográfica, en donde, dependiendo de la capacidad de transporte del flujo encauzado, puede depositarse inmediatamente o alcanzar distancias considerables hasta depositarse en planicies de inundación, embalses, canales de riego, canales de navegación, sistemas de conductos pluviales, etc. En dichas zonas el problema es la deposición del sedimento generado por la erosión hídrica a nivel de la cuenca. Asimismo, los sedimentos finos erosionados y transportados pueden adsorber sustancias contaminantes y convertir las zonas de almacenamiento en reservorios de sedimentos contaminados. En el presente trabajo se describe la formulación, implementación computacional y la aplicación del modelo CTSS8\_SEDMU adecuado para evaluar la producción de sedimentos a escala temporal de eventos de crecidas mediante la ecuación universal de pérdida de suelo modificada MUSLE acoplada a un modelo hidrológico-hidráulico físicamente basado y espacialmente distribuido, con representación de propagación unidimensional del flujo encauzado y cuasi-bidimensional del flujo sobre el terreno. Mediante la aplicación del modelo se simuló el proceso de erosión real y la erosión potencial durante el evento de 3 de abril de 1994 en la cuenca del A° Ludueña. Esto permitió, para ambos escenarios simulados, estimar la erosión a escala de cuenca y evaluar la cantidad de sedimentos que ingresaron al entubamiento del A° Ludueña en la ciudad de Rosario durante dicho evento.

**Palabras Clave:** modelación hidro-sedimentológica, erosión, sedimentación, A° Ludueña.

## INTRODUCCIÓN

Los procesos de erosión relacionados con el flujo hídrico se pueden dividir en procesos de erosión superficial (o erosión en láminas) y en procesos de erosión lineal (o erosión canalizada). Tal distinción se relaciona con la conocida división que se hace en Hidrología entre el flujo superficial sobre el terreno (*overland flow*) y el flujo encauzado (*stream flow*). Mientras el flujo sobre el terreno es responsable de la erosión superficial, extendida sobre toda la superficie de la cuenca; el flujo encauzado es responsable de la erosión lineal del lecho y de las márgenes a lo largo de los cursos de agua (Basile, 2004b). Si bien la erosión superficial y la erosión lineal se relacionan en definitiva con la lluvia, hay algunas diferencias fundamentales entre ambos procesos erosivos. La erosión superficial se produce por el impacto directo de las gotas de lluvia sobre el suelo (no adecuadamente protegido por vegetación) que origina el desmenuzamiento o disgregación de las partículas, las cuales son posteriormente transportadas por el flujo sobre el terreno hasta que se depositan en alguna depresión topográfica o alcanzan la red hidrográfica. La tasa de disgregación depende principalmente de la intensidad de lluvia, de la vegetación y de las características del suelo. La tasa de transporte depende de la escorrentía superficial (por lo tanto de la intensidad de lluvia), de la topografía y de la disponibilidad de sedimento. En cambio, la erosión lineal se vincula con la capacidad de transporte del flujo hídrico encauzado, la cual depende de la tensión de corte aplicada y de las características sedimentológicas del lecho, además, la erosión del lecho y del pié de margen (entre otros factores) pueden dar lugar a procesos de colapsos masivos debido a inestabilidad geotécnica de las márgenes (Basile; 2004b, 2005).

Entre la erosión superficial y la erosión lineal se observan formas intermedias de erosión tales como la erosión en cárcavas (*gully erosion*) y la erosión en surcos (*rill erosion*). Desde un punto de vista hidrológico la erosión en cárcavas puede definirse como una forma particularmente intensa de erosión lineal, que se produce a lo largo del desarrollo de un nuevo canal, caracterizado por una capacidad de transporte excesiva respecto al suministro de sedimento de su cuenca de influencia. La erosión en surcos, en cambio, puede definirse como una forma severa de erosión superficial. Los surcos, una vez que se han formado, pueden considerarse como el estado embrionario de una cárcava.

Otros importantes procesos de erosión relacionados con la lluvia son los movimientos de masa, es decir, los procesos de remoción masiva de sedimentos tales como los deslizamientos de tierras y los flujos hiperconcentrados (flujos de detritos, flujos de barro). Los procesos de remoción en masa, típicos de zonas geográficas caracterizadas por elevados gradientes topográficos, se presentan generalmente durante eventos hidrológicos extraordinarios y generan excesivos ingresos de sedimentos en los cursos de agua (Basile, 2002).

Las consecuencias de la erosión hídrica superficial se observan in-situ a nivel local y en zonas alejadas del lugar de generación del sedimento. Los efectos a nivel local son particularmente importantes en suelos destinados a la agricultura. En efecto, la desintegración de la estructura del suelo y la pérdida de materia orgánica y nutrientes de los horizontes superiores inducen una disminución de su productividad, lo cual conduce a un mayor gasto en fertilizantes y más tarde puede ocasionar el abandono de la agricultura en dichas tierras (Pimentel *et al.*, 1995; Crosson, 1997). Además de este problema local, generado por la erosión a nivel de cuenca, existe el problema creado por la deposición de dicho sedimento en zonas alejadas, tales como, planicies de inundación, embalses, canales de riego, canales de navegación, sistemas de conductos pluviales, etc. (Clark, 1985; Boardman *et al.*, 1994; Verstraeten *et al.*, 1999; Basile *et al.*, 2005a,b). Asimismo, los sedimentos finos son susceptibles de adsorber sustancias contaminantes, como agroquímicos, etc.,

lo cual puede inducir un incremento de los niveles de nitrógeno y fósforo en los cuerpos de agua receptores y desencadenar procesos de eutrofización (Steege *et al.*, 2001).

Para estimar la erosión hídrica a nivel de cuenca se emplean generalmente modelos matemáticos. Los modelos matemáticos para el pronóstico de erosión hídrica pueden ser clasificados en (i) empíricos, (ii) físicamente basados o (iii) una combinación de los dos primeros (Sun *et al.*, 2002). Una revisión de estos modelos ha sido recientemente realizada por Singh *et al.* (2002) y Borah *et al.* (2003). Por otra parte, en función de la escala temporal para la cual han sido desarrollados, algunos modelos permiten estimar la erosión producida por un evento hidrológico particular, otros permiten la simulación continua y otros evalúan la erosión media anual a largo plazo. Entre los modelos por eventos pueden mencionarse: ANSWERS (Beasley *et al.*, 1980), AGNPS (Young *et al.*, 1987), KINEROS (Woolisher *et al.*, 1990), CASC2D-SED (Julien *et al.*, 2002), EROSET (Sun *et al.*, 2002), PSED (Ching-Nuo Chen *et al.*, 2006). Algunos modelos de simulación continua son: ANSWERS-Continuous (Bouraoui *et al.*, 1996), SHESED (Wicks *et al.*, 1996), SWAT (Arnold *et al.*, 1998; Neitsch *et al.*, 2002), AnnAGNPS (Bingner *et al.* 2001), InHM (Heppner *et al.*, 2005) y para estimación de la erosión media anual tenemos: WaTEM/SEDEM (Van Rompaey *et al.* 2001), EROSUP-U (Basile *et al.*, 2005a).

En este trabajo se presenta el desarrollo, la implementación computacional y la aplicación del modelo CTSS8\_SEDMU adecuado para evaluar la producción de sedimentos mediante la ecuación universal de pérdida de suelo modificada (MUSLE) acoplada al modelo hidrológico-hidráulico CTSS8. Mediante la aplicación del modelo se simuló el proceso de erosión superficial real y la erosión superficial potencial durante el evento del 3 de abril de 1994 en la cuenca del A° Ludueña. Esto permitió, para ambos escenarios simulados, estimar la erosión a escala de cuenca, evaluar la cantidad de sedimentos que ingresaron al entubamiento del A° Ludueña en la ciudad de Rosario durante dicho evento.

## MODELO HIDRO-SEDIMENTOLÓGICO CTSS8-SEDMU

El modelo hidrológico-hidráulico, físicamente basado y espacialmente distribuido, CTSS8 (Riccardi, 2000) está basado en los esquemas de celdas originalmente propuestos por Cunge (1975). En sucesivas investigaciones se ha ampliado el campo de aplicación original (Riccardi, 1995, 1997 y 2000). Actualmente, el CTSS8 permite la simulación de escurrimiento superficial multidireccional en ambientes rurales y urbanos. En cada celda de discretización es posible plantear el ingreso de flujo proveniente de precipitación neta, aporte de caudales externos e intercambio de caudales con celdas adyacentes. El modelo ha sido desarrollado para la simulación numérica a escala temporal de eventos. El escurrimiento superficial puede ser propagado mediante un espectro de leyes de descarga entre celdas, las cuales han sido derivadas a partir de la ecuación dinámica de Saint Venant. El sistema permite realizar una representación de propagación unidimensional del flujo encauzado y cuasi-bidimensional del flujo sobre el terreno. Para contemplar condiciones de flujo particulares se utilizan leyes de descarga específicas para puentes, vertederos, alcantarillas, etc.. En el caso de simulación numérica en ambientes urbanos se incorporan leyes de descarga para tránsito hidrodinámico en conductos a presión, uniones entre celdas de tipo sumidero, compuerta y bombeo. El CTSS8 es operado desde una plataforma computacional desarrollada en entorno de Windows (Rentería *et al.*, 2003; Stenta *et al.*, 2005). Al modelo CTSS8 se le ha acoplado la ecuación universal de pérdida de suelo modificada MUSLE. De esta manera, es posible evaluar el proceso de erosión hídrica a escala espacial de subcuencas y a escala temporal de eventos de crecidas utilizando la información hidrodinámica generada con el modelo hidrológico-hidráulico CTSS8. El

nuevo modelo se ha denominado CTSS8\_SEDMU y las ecuaciones gobernantes se describen sintéticamente a continuación.

### **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:

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

donde  $P_{i(t)}$  es lluvia, interceptación, almacenamiento superficial, infiltración e intercambio externo de caudales ( $m^3/s$ ) en la celda  $i$ ;  $A_{S_i}$  y  $z_i$  son respectivamente el área mojada superficial ( $m^2$ ) y el nivel de agua ( $m$ ) en celda  $i$  y  $Q_{k,i}$  caudal intercambiado ( $m^3/s$ ) entre las celdas  $k$  e  $i$ .

### **Leves de descarga entre celdas**

Unión Cinemática: Se utiliza cuando la información hidrodinámica se propaga solamente hacia delante y supone un balance entre las fuerzas de fricción y gravedad exclusivamente. Se deriva despreciando los términos asociados a fuerzas de inercia y de presión hidrostática en la ecuación de momentum de Saint Venant. Es decir, se trata de una ecuación de flujo uniforme donde el caudal queda expresado como:

$$Q_{k,i}^{(n)} = K_{k,i} S_{0k,i}^{1/2} \quad (2)$$

donde  $S_{0k,i}$  es la pendiente longitudinal de la vinculación entre las celdas  $k$  e  $i$  (-) y  $K_{k,i}$  es el factor de conducción ( $m^3/s$ ) dado por:

$$K_{k,i} = \frac{1}{\eta} R_{k,i}^{2/3} A_{t_{k,i}} \quad (3)$$

donde  $R_{k,i}$  y  $A_{t_{k,i}}$  son respectivamente el radio hidráulico ( $m$ ) y el área transversal ( $m^2$ ) de la vinculación entre las celdas  $k$  e  $i$  y  $\eta$  es el coeficiente de rugosidad de Manning ( $s/m^{1/3}$ ).

Unión tipo Río Simple: Se utiliza para escurrimientos con preponderancia de las fuerzas de presión hidrostática, gravedad y fricción. El caudal se deduce a partir de la discretización de la ecuación completa de momentum considerando flujo con fuerzas inerciales despreciables:

$$Q_{k,i}^{(n)} = \text{signo} [z_k^{(n)} - z_i^{(n)}] \frac{K_{k,i}}{\sqrt{\Delta x_{k,i}}} \sqrt{|z_k^{(n)} - z_i^{(n)}|} \quad (4)$$

donde  $\Delta x_{k,i}$  es la distancia entre centros de celdas  $k$  e  $i$  y  $z_k$  el nivel de agua en celda  $k$ . Las restantes variables fueron definidas anteriormente.

Asimismo, en el modelo se pueden utilizar Uniones tipo Río Cuasi-Dinámica y Dinámica deducidas a partir de la ecuación completa de momentum, las cuales son aplicadas principalmente al tránsito unidimensional de flujo encauzado.

Unión tipo Vertedero: Representa vinculaciones donde se evidencia un límite físico como terraplenes de rutas, vías, etc. Se utiliza la ecuación de vertederos de cresta ancha para descarga

libre:

$$Q_{k,i}^{(n)} = \mu_1 b \sqrt{2g} [z_k^{(n)} - z_i^{(n)}]^{3/2} \quad (5.a)$$

y para descarga ahogada:

$$Q_{k,i}^{(n)} = \mu_2 b \sqrt{2g} [z_k^{(n)} - z_w] \sqrt{z_k^{(n)} - z_i^{(n)}} \quad (5.b)$$

donde  $z_w$  y  $b$  son la cota de cresta y longitud del vertedero respectivamente y  $\mu_1$ ,  $\mu_2$  son los coeficientes de descarga de vertedero libre y ahogado respectivamente.

Unión tipo Puente: Se utiliza la expresión de caudal para vertederos de cresta ancha con escalón de fondo nulo y coeficiente de descarga según Chow (1959) para flujo a través de constricciones.

Por razones de espacio no se presentan las leyes de descarga que contemplan condiciones de borde internas especiales (pérdida de carga en expansiones bruscas, secciones de control, etc.), ni las utilizadas principalmente en la simulación en ambientes urbanos.

### **Descarga sólida por subcuencas**

La erosión superficial por subcuenca, agregada temporalmente a escala de un evento, se determina mediante el submodelo SEDMU, el cual se basa en la ecuación universal de pérdida de suelos modificada MUSLE (Williams, 1975; Neitsch *et al.*, 2002). El factor de erosividad de lluvia de USLE es reemplazado por el factor de escorrentía, el cual se define como una función del caudal pico y del correspondiente volumen de escurrimiento de la crecida. La producción neta de sedimentos para una subcuenca genérica  $j$  se expresa como:

$$SY_j = \alpha (VQ_p)_j^\beta K_j LS_j C_j P_j \quad (6)$$

donde  $SY_j$  es la producción neta de sedimentos en toneladas métricas (T);  $Q_p$  es el caudal pico del evento en ( $m^3/s$ ) y  $V$  es el correspondiente volumen de escurrimiento en ( $m^3$ ); el coeficiente  $\alpha=11,8$ ; el exponente  $\beta=0,56$  y  $K_j$ ,  $LS_j$ ,  $C_j$  y  $P_j$  son respectivamente los factores de erosionabilidad del suelo, topografía, cobertura vegetal y prácticas conservacionistas para control de erosión, similares a los definidos en la ecuación universal de pérdida de suelos (Basile *et al.*, 2005a).

La ecuación (6) es empírica y estima exclusivamente la erosión superficial, es decir, no contempla los procesos de erosión del flujo encauzado (erosión de lecho y márgenes) ni obviamente los aportes debidos procesos de remoción masiva de sedimentos (deslizamientos, flujos de detritos, etc.).

La estructura de la ecuación (6) es similar a la estructura de la ecuación de transporte de sedimentos a escala temporal de un evento de crecida obtenida por Basile (2004a) a partir de la integración del transporte instantáneo sobre la duración del hidrograma. En (6) los factores de erosividad por escorrentía, de erosionabilidad de suelo y topográfico son similares respectivamente a los factores hidrológico, sedimentológico y morfológico derivados por Basile. En particular, el factor hidrológico es representado por el producto entre el caudal pico y el volumen del hidrograma, ambos elevados a sendos coeficientes, en manera análoga al factor de erosividad por escorrentía representado en (6).

### **Formulación numérica**

Para la resolución numérica de la hidrodinámica se utiliza un esquema implícito (Cunge, 1975) del tipo:

$$As_i \frac{\Delta z_i}{\Delta t} = P_i + \sum_{k=1}^j Q_{k,i}^{(n)} + \sum_{k=1}^j \frac{\partial Q_{k,i}^{(n)}}{\partial z_i} \Delta z_i + \sum_{k=1}^j \frac{\partial Q_{k,i}^{(n)}}{\partial z_k} \Delta z_k \quad (7)$$

donde las funciones  $As_i$ ,  $P_i$  y  $Q_{k,i}$  son conocidas en el tiempo  $t=n\Delta t$  y los incrementos  $\Delta z_i$  y  $\Delta z_k$  son las incógnitas,  $j$  es la cantidad de celdas vinculadas a la celda  $i$ .

La resolución numérica se realiza mediante un algoritmo matricial basado en el método de Gauss-Seidel. Las condiciones de borde posibles de imponer son: a) Cota de agua en función del tiempo:  $z(t)$ ; b) Caudal en función del tiempo:  $Q(t)$  y c) Relación cota - caudal:  $Q = f(z)$ . El modelo requiere las alturas de agua iniciales en todas las celdas, y si se utilizan uniones tipo río dinámicas deben definirse los caudales iniciales en tales vinculaciones.

## **APLICACIÓN DEL MODELO HIDRO-SEDIMENTOLÓGICO**

### **Breve descripción del área de estudio**

La cuenca del A° Ludueña se encuentra ubicada en el sur de la provincia de Santa Fe (Argentina) y comprende parte de la ciudad de Rosario y un grupo de 8 poblaciones (Figura 1). Su red de cursos permanentes y transitorios tiene una longitud de aproximadamente 120 Km y los cauces se desarrollan sobre suelos cohesivos altamente resistentes a la erosión inducida por el flujo encauzado (Riccardi *et al.*, 2005). El área de la cuenca es de 717 Km<sup>2</sup>, con una pendiente media de 1 ‰. Los horizontes superiores de los suelos preponderantes en la cuenca pueden clasificarse texturalmente como franco limosos, con porcentajes promedios de arena muy fina entorno al 6%, arcilla 21% y limo 73%, el porcentaje promedio de materia orgánica es de alrededor del 2%. La sección de control corresponde al cruce del arroyo con el puente de la Av. Circunvalación en la ciudad de Rosario. El caudal base es de 0,5 m<sup>3</sup>/s y el caudal medio anual es de 2,7 m<sup>3</sup>/s, habiéndose observado caudales picos del orden de los 400 m<sup>3</sup>/s durante la crecida del año 1986. Los hidrogramas para crecidas ordinarias, registrados en dicha sección, muestran un tiempo de base de alrededor de 60 horas y tiempos al pico del orden de las 30 horas. La carga sólida se compone en su totalidad de sedimentos finos transportados como carga de lavado (wash load). Las concentraciones de sólidos suspendidos para caudales líquidos ordinarios, medidas recientemente en el puente de Av. Circunvalación, varían entre 10 ppm y 700 ppm en peso. Por tratarse de un sistema hidrológico de llanura, en el A° Ludueña los procesos de remoción masivos están descartados. Por otra parte, el aporte correspondiente a los procesos de erosión debido al flujo encauzado pueden considerarse mucho menores que los producidos por erosión superficial (Basile *et al.*, 2005b).

La cuenca presenta una serie de intervenciones antrópicas tales como terraplenes de rutas y ferrocarriles, alcantarillas, puentes, presa de retención de crecidas, etc. La cuenca del A° Ludueña propiamente dicho se desarrolla casi enteramente al sur de la Ruta Nacional N° 9 (RN9), mientras que, al norte de dicha ruta se desarrolla el sistema formado por el canal Ibarlucea y el canal Salvat. La presa retardadora de crecidas se ubica aproximadamente 1 Km aguas arriba de la intersección del A° Ludueña con la RN9. El área de aporte que delimita el cierre de la presa es de 440 Km<sup>2</sup> aproximadamente. El embalse creado por el cierre se encuentra normalmente vacío. La presa

retardadora de crecidas entró en funcionamiento en el año 1995. En inmediaciones del cruce del A° Ludueña con la Av. de Circunvalación de Rosario (6 Km aguas abajo de la intersección con la RN9) el arroyo recibe el aporte de la cuenca del canal Ibarlucea (sistema formado por el canal Ibarlucea y el canal Salvat) cuya área de aporte es de aproximadamente 240 Km<sup>2</sup>. Aguas abajo de la Av. de Circunvalación el A° Ludueña recorre zonas densamente pobladas de la ciudad de Rosario hasta desembocar en el río Paraná. En parte de este recorrido urbano el arroyo se encuentra entubado en un tramo de 1,5 Km mediante 5 grandes conductos subterráneos cuya capacidad global de conducción es de 300 m<sup>3</sup>/s aproximadamente. El sistema de grandes conductos está constituido por una obra de embocadura de donde salen 5 conductos, uno de los cuales acomete en uno mayor aguas abajo, llegando a la obra de desembocadura 4 conductos. El tramo desde la desembocadura del entubamiento hasta la desembocadura en el río Paraná tiene una longitud de 0,8 Km aproximadamente.

### **Descripción de la problemática asociada a la producción de sedimentos en la cuenca**

Los sedimentos erosionados en la cuenca, además de degradar la potencialidad productiva de los suelos, contribuyen con los procesos de sedimentación que se verifican actualmente en la presa de retención de crecidas y en las zonas de los entubamientos del arroyo Ludueña en la ciudad de Rosario. En efecto, parte de los sedimentos generados en la cuenca del A° Ludueña propiamente dicho son retenidos por la presa y contribuyen con el proceso de sedimentación a largo plazo del vaso de la misma. Evaluaciones de erosión y sedimentación realizadas con el modelo EROSUP-U (Basile *et al.*, 2005a) han evidenciado que la capacidad de almacenamiento de la presa no se ve sustancialmente afectada por el proceso de sedimentación a largo plazo, incluso para aportes sólidos máximos evaluados considerando la erosión potencial. Esto se debe a la baja eficiencia de atrape de sedimentos que presenta la presa, justificada por la modalidad de transporte de los sedimentos extremadamente finos aportados por la cuenca de influencia, los cuales, al estar el embalse normalmente vacío (bajos tiempos de retención) pueden alcanzar con cierta facilidad los descargadores de fondo no regulados que posee la presa.

Por lo tanto, los conductos del entubamiento pueden ser sujetos a un severo proceso de sedimentación. En efecto, los sedimentos que pasan a través de las estructuras de descarga de la presa y los sedimentos generados en el sector de la cuenca comprendido entre la presa y la Av. Circunvalación se suman a los sedimentos producidos por la cuenca del canal Ibarlucea. Dicha carga sólida ingresa a la zona de la embocadura de los entubamientos del A° Ludueña en la ciudad de Rosario, localizados aproximadamente 2 Km aguas arriba de la desembocadura en el río Paraná. Esta última zona funciona como una suerte de embalse, espontáneamente regulado por las fluctuaciones de niveles hidrométricos del río Paraná, lo cual induce la deposición de una parte de los sedimentos que ingresan, mientras que, la parte restante se descarga en el río Paraná.

### **Implementación del modelo**

El modelo se utilizó para simular un evento de crecida producido por la lluvia extraordinaria del 03/04/1994. El total medio precipitado sobre la cuenca del A° Ludueña en esa ocasión fue de 155 mm, con una lluvia neta de 106 mm y un caudal máximo de 200 m<sup>3</sup>/s en la sección de Av. Circunvalación.

Para implementar el modelo se utilizaron hietogramas provenientes de tres estaciones de la cuenca (Rosario Aeropuerto, Despacho Nacional de Cargas e Ibarlucea), además, se contó con los limnigramas registrados en las estaciones del Golf Club y de Av. Circunvalación. En la Figura 2 se observa la localización de las distintas estaciones y en las Figuras 3 a 5 se presentan los hietogramas

correspondientes a cada estación. Como información adicional de lluvias se contó con la pluviometría de las estaciones Zavalla y Coronel Arnold. La lluvia neta se estimó en base a la operación del modelo de simulación para áreas de llanuras SHALL3 (Zimmermann, 2000) el cual fue calibrado oportunamente.

Para constituir el modelo hidrológico-hidráulico se ensayaron diferentes discretizaciones topológicas y espaciales en busca del mejor grado de detalle alcanzable con la información disponible, considerando principalmente los trazados de las vías de comunicación con importantes terraplenamientos, los cursos principales y cañadones secundarios, las obras de arte (alcantarillas y puentes) y la dinámica hídrica superficial observada en crecidas históricas. La cuenca se discretizó con 779 celdas, quedando conformadas 1473 vinculaciones (Figura 6). En la sección de control de Av. Circunvalación se especificó la condición de borde mediante una relación nivel hidrométrico-caudal. Una vez discretizado espacialmente el dominio se procedió a digitalizar la información proveniente de curvas de nivel de la cuenca con lo que se determinaron las cotas de fondo de cada celda. Con esta primer discretización se simularon crecidas considerando la unión de tipo valle-valle como única vinculación posible. Una vez que se constató la conectividad entre las celdas se incorporaron las celdas correspondientes a los canales y al arroyo. Posteriormente se incorporaron las alcantarillas y terraplenes viales y ferroviarios.

En cada etapa se realizaron corridas de prueba y se realizaron controles de continuidad, celeridad de onda, ausencia de inestabilidades y otras perturbaciones numéricas asociadas al flujo hídrico. Debe destacarse el hecho que, al trabajar con este tipo de dominio de cálculo, es necesario constituir el modelo en etapas y ejecutar simulaciones de prueba en cada una de ellas para poder ejercer un control efectivo sobre los parámetros de flujo calculados.

En el proceso de calibración del modelo para el escurrimiento superficial se ajustaron los coeficientes de rugosidad de Manning de las celdas y los coeficientes de gasto en puentes y alcantarillas. En las celdas valle los valores de  $\eta$  variaron entre 0,1 y 0,15; en las celdas del curso principal  $\eta$  varió entre 0,035 y 0,050; mientras que, en las celdas de los cursos secundarios el mismo varió entre 0,040 y 0,060. Los coeficientes de gasto en puentes y alcantarillas variaron entre 0,6 y 0,9.

A los efectos del cálculo de la erosión se conformaron 7 subcuencas en el sector de A° Ludueña propiamente dicho, 3 subcuencas en el sector del canal Ibarlucea y 2 subcuencas en el sector del canal Salvat (Figura 2). La erosionabilidad del suelo se determinó utilizando datos sobre las características texturales de los suelos de la cuenca, derivados de cartas de suelos del INTA y empleando las ecuaciones definidas en el modelo EROSUP-U (Basile *et al.* 2005a). Los valores de K obtenidos variaron entre 0,3 y 0,33. Los parámetros geomorfológicos para cada subcuenca se determinaron a partir de información digitalizada de curvas de nivel con equidistancia de 2,5 m, red de cursos permanentes y temporarios en CAD.

Los valores promedios anuales del factor asociado a la cobertura vegetal C, determinados en función de datos de NDVI (Basile *et al.* 2005a), fueron convertidos en valores diarios mediante la metodología utilizada en el modelo SWAT 2000 (Neitsch *et al.*, 2002). Los valores obtenidos variaron entre 0,2 y 0,4. Para calcular la erosión superficial potencial a cada subcuenca se le asignó un valor de  $C=1$ . Para caracterizar las diversas prácticas de manejo y para estimar la erosión superficial real se especificó un valor promedio del factor de prácticas conservacionistas P igual a 0,6 para cada subcuenca. Mientras que, para estimar la erosión superficial potencial en cada subcuenca el mismo se especificó igual a la unidad.

## ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la Figura 7 se presentan los hidrogramas calculados en Av. Circunvalación y en el Golf Club, conjuntamente con los hidrogramas observados durante el evento del 03/04/1994. El limnógrafo en el Golf Club, debido a un mal funcionamiento, solo registró la parte final de la rama descendente del hidrograma. En los hidrogramas calculados se nota que el modelo genera una curva de descenso más empinada que la observada, lo cual se atribuye directamente a la incertidumbre acerca de los mecanismos reales de almacenamiento a escala de subgrilla. Sin embargo, considerando el nivel de detalle adoptado, los resultados obtenidos con el modelo son igualmente muy satisfactorios. Además, es necesario resaltar las capacidades del modelo para simular los procesos hidrodinámicos en forma espacialmente distribuida y multidireccionalmente, lo cual permite representar en forma adecuada los procesos propagatorios en áreas de llanura fuertemente antropizadas.

En la Tabla 1 se presentan los valores de caudales pico y volúmenes de escurrimiento conjuntamente con la producción neta y la producción neta específica de sedimentos para cada subcuenca, considerando la erosión real y la erosión potencial. La erosión neta específica calculada para el caso de erosión real, asociada al evento del 03/04/1994, varió entre 20 y 410 T/Km<sup>2</sup> y para el caso de erosión potencial, la misma varió entre 81 T/Km<sup>2</sup> y 1967 T/Km<sup>2</sup>.

En la Figura 8 se observa que, considerando el proceso de erosión real, el aporte total de sedimentos en Av. Circunvalación es de 63756 T. Dicho aporte total puede descomponerse en 37763 T (aproximadamente el 60%) proveniente del Ludueña propiamente dicho y el restante 40 % aproximadamente, es decir, 25993 T proveniente del canal Ibarlucea-Salvat. La concentración de sedimentos media estimada para el evento, inmediatamente aguas abajo del puente de Av. Circunvalación, es de 838 ppm en peso.

Si bien no se cuentan con mediciones de transporte de sedimentos en suspensión durante dicho evento, es posible establecer algunas comparaciones con valores de referencia obtenidos en evaluaciones precedentes y mediciones recientes de concentración de sedimentos en suspensión en la sección de Av. Circunvalación. En dicha sección, la producción neta media anual evaluada con el modelo EROSUP-U, oportunamente calibrado con el volumen observado de sedimentos depositados en el entubamiento del A° Ludueña en un período de 8 años, es de 30144 T con el 61% proveniente del Ludueña y el 39% proveniente del Ibarlucea-Salvat (Basile *et al.*, 2005a). La producción neta estimada con el presente modelo para el evento es casi 2,1 veces mayor que este valor. A fines comparativos es válido utilizar este valor ya que el modelo EROSUP-U estima la producción neta media anual a largo plazo, es decir, promediada en un período de diez o más años. Mientras que, la producción neta estimada con el presente modelo se corresponde con un evento extraordinario ocurrido en un año particular y es verosímil que la misma se posicione por encima de la media anual. Por otra parte, mediciones recientes realizadas en Av. Circunvalación muestran que, para caudales ordinarios, la concentración instantánea de sedimentos en suspensión varía entre 10 y 700 ppm en peso. La concentración de sedimentos en suspensión media para el evento, calculada en función del aporte sólido total y el volumen del hidrograma, es de 838 ppm en peso. Por lo tanto, para dicho evento se han verificado valores instantáneos por encima y por debajo de tal valor, los cuales son verosímiles si se comparan con los valores medidos y se considera que los caudales máximos del evento fueron extraordinarios.

Considerando el proceso de erosión potencial el aporte total de sedimentos en Av. Circunvalación es de 363197 T. Dicho aporte total se discrimina en 229813 T (aproximadamente el 63%) correspondiente al A° Ludueña propiamente dicho y el 37 % restante, es decir, 133384 T

correspondiente al canal Ibarlucea-Salvat (Figura 9). En este caso, la concentración de sedimentos media estimada para el evento, inmediatamente aguas abajo del puente de Av. Circunvalación, es de 4775 ppm en peso. Es necesario señalar que se trata del aporte máximo que pudiera haber ocurrido durante el evento si, en toda la cuenca, el suelo se hubiera encontrado desnudo sin cobertura vegetal y no se hubieran implementado medidas de control conservacionista del suelo. Considerando la correspondiente concentración calculada y en función de las mediciones realizadas recientemente, puede aseverarse que se trata de una concentración media extremadamente elevada para el sistema hidrológico del A° Ludueña.

## CONCLUSIONES

El modelo hidro-sedimentológico CTSS8-SEDMU presentado en el trabajo es apropiado para simular los procesos de escurrimiento superficial en forma físicamente basada y espacialmente distribuida y el aporte sólido en forma empírica y agregado a escala de subcuenca.

Muchos de los modelos hidro-sedimentológicos mencionados en la introducción del trabajo representan la hidrodinámica en forma simplificada a través de la implementación de modelos propagatorios unidimensionales del tipo de tránsito directo, de tránsito hidrológico o de onda cinemática. Tal representación de los procesos propagatorios para el flujo sobre el terreno y encauzado no es adecuada en zonas de llanura fuertemente antropizadas, donde el escurrimiento es condicionado por terraplenamientos viales y ferroviarios, alcantarillas, puentes, etc.. Por un lado, tal abordaje no permite la transmisión de información hidrodinámica hacia aguas arriba y, por el otro, en numerosas situaciones la unidimensionalidad no es representativa del patrón de escurrimiento real. Efectivamente, como ha sido constatado en la simulación con el presente modelo, durante el evento dichas estructuras producen remansos que afectan las variables del flujo hasta distancias considerables aguas arriba. Además, cuando los cursos de agua desbordan la dinámica del escurrimiento en la zona del valle adopta características preponderantemente bidimensionales.

El modelo ha permitido reproducir satisfactoriamente los hidrogramas observados durante el evento del 03/04/1994 y obtener parámetros de flujo adecuados para evaluar la producción neta de sedimentos en diferentes secciones del sistema hidrológico del A° Ludueña, considerando tanto el proceso de erosión real como el riesgo de erosión potencial. Los valores de producción neta de sedimentos estimados con el modelo son aceptables y entran dentro de los rangos posibles de acuerdo al comportamiento sedimentológico de la cuenca.

Para incrementar la capacidad predictiva del modelo, en lo referido a procesos de erosión/sedimentación, y aprovechando las potencialidades de simulación de parámetros de flujo hídrico que posee actualmente, es necesario avanzar en el desarrollo del mismo incorporando la representación físicamente basada y espacialmente distribuida de los procesos de producción y tránsito de sedimentos.

## BIBLIOGRAFÍA

- Arnold, J.G.; R. Srinivasan; R.S. Muttiah and J.R. Williams** (1998). *“Large-area hydrologic modeling and assessment: Part I. Model development”*. Journal of American Water Resources Association, 34(1), 73-89.
- Basile, P.A.** (2002). *Simulación Numérica de Eventos Hidro-Sedimentológicos Extremos en Ambientes Fluviales Montanos y Pedemontanos*. Cuadernos del CURIHAM, Vol. 8, N° 1, pp. 11-25, 2002. ISSN 15142906. Latindex N° 1715.
- Basile, P.A.** (2004a). Transporte de Sedimentos a Distintas Escalas Temporales. XXI Congreso Latinoamericano de

- Hidráulica, 2004, San Pablo. CD-Rom p. T1-T10.
- Basile, P.A.** (2004b). *El Sistema Fluvial*. En: Pedro A. Basile (Org.). Geomorfología e Hidráulica Fluvial. Capítulo 1 del libro electrónico Geomorfología e Hidráulica Fluvial. Medio de divulgación: Internet; Sitio: <http://c-virtual.fceia.unr.edu.ar>.
- Basile, P.A.** (2005). “*Modelación de la Erosión de Márgenes por Mecanismo de Colapso Masivo Asociado a Falla Plana*”. XX Congreso Nacional del Agua y III Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur, Mendoza. CONAGUA 2005. CD-Rom ISBN: 9872214301.
- Basile, P.A.; G. Riccardi y H. Stenta** (2005a). “*Modelación de la Producción de Sedimentos a Escala de Cuenca en el Sistema del A° Ludueña, Santa Fe, Argentina*”. XX Congreso Nacional del Agua y III Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur, Mendoza. CONAGUA 2005. CD-Rom ISBN: 9872214301.
- Basile, P.A.; G. Riccardi; H. Stenta y M. Garcia** (2005b). “*Evaluación de Procesos de Erosión/Sedimentación en el Sistema Hidrológico del A° Ludueña*”. II Simposio Regional Sobre Hidráulica de Ríos, Neuquén. Hidráulica de Ríos 2005.
- Beasley, D.B.; L.F. Huggings and E.J. Monke** (1980). “*ANSWERS: A model for watershed planning*”. Transactions of the ASAE , 23(4), 938-944.
- Bingner, R.L. and F.D. Theurer** (2001). *AnnAGNPS Technical Processes: Documentation Version 2*.
- Boardman, J.; L. Ligneau; A. De Roo and K. Vandaele** (1994). “*Flooding of property by runoff from agricultural land in northwestern Europe*”. Geomorphology 10, 183-196.
- Borah D.K. and M. Bera** (2003). “*Watershed-Scale Hydrologic and Nonpoint-Source Pollution Models: Review of Mathematical Bases*”. Transactions of the ASAE. Vol. 46(6), 1553-156.
- Bouraoui, F. and Dillaha** (1996). “*ANSWERS: Runoff and sediment transport model*”. Journal of Environmental Engineering, 122(6), 493-502.
- Ching-Nuo Chen; Chih-Heng Tsai and Chang-Tai Tsai** (2006). “*Simulation of sediment yield from watershed by physiographic soil erosion-deposition model*”. Journal of Hydrology (2006), 327, 293-303.
- Chow, Ven Te** (1959). *Open channel hydraulics*. McGraw-Hill Education (31 Dec. 1959), 692 p. ISBN: 007085906X.
- Clark, E.H.** (1985). “*The off-site costs of soil erosion*”. Journal of Soil and Water Conservation 40, 19-22.
- Crosson, P.** (1997). “*Will erosion threaten agricultural productivity?*”. Environment 39, 4-5.
- Cunge, J.** (1975) “*Two Dimensional Modelling of Flood Plains*”. Cap. 17 Unsteady flow in open channels (Ed. K. Mahmood and V. Yevjevich). Water Resources Publications, Fort Collins.
- Heppner, C.S.; Q. Ran; J.E. VanderKwaak and K. Loague** (2005). “*Adding sediment transport to the integrated hydrology model (InHM): Development and testing*”. Advances in Water Resources 29 (2006) 930-943.
- Julien, P. and R. Rojas** (2002). “*Upland Erosion Modeling with CASC2D-SED*”. International Journal of Sediment Research, ISSN 1001-6279, 17 (4), 265-274.
- Neitsch, S.L.; Arnold, J.G.; Kiniry, J.R.; Williams, J.R.; King, K.W.** (2002). *SWAT, Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation. Version 2000*. Texas Water Resources Institute, Collage Station, Texas. TWRI Report TR-191.
- Pimentel, D.; C. Harvey; P. Resosudarmo; K. Sinclair; D. Kurz; M. McNair; S. Crist; L.Shpritz; L. Fitton; R. Saffouri and R. Blair** (1995). “*Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits*”. Science 267, 1117-1123.
- Rentería J.P. y H. Stenta** (2003). *Desarrollo de soporte computacional interactivo para sistema de simulación hidrológica superficial*. Tesis de Grado Ingeniería Civil. FCEIA-UNR. Rosario, Argentina.
- Riccardi, G.** (1997). “*The mathematical modelling for the delimitation of inundation risk zones*”. Sustainability of Water Resources under Increasing Uncertainty. IAHS Publication Nro 240, ISSN 0144-7815, Wallingford, pp.127-136.
- Riccardi, G.** (2000) “*Un Sistema de Simulación Hidrológica-Hidráulica cuasi-2D multicapa para ambientes rurales y urbanos*”. Tesis Doctoral, FCEfyN, UNC, Córdoba.
- Riccardi, G.; E. Zimmermann, y R. Maurig** (1995). “*Mathematical Modelling of flood for the delimitation of zones with inundation risk*”. International Symposium on Runoff Computations for Water Projects, IAHS, San Petesburgo.
- Riccardi, G.; P.A. Basile; H. Stenta; G. Riesco y P. Baglietto** (2005). “*Ajuste Regional de Predictores de Erosión en Lechos Cohesivos*”. XX Congreso Nacional del Agua y III Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur, Mendoza. CONAGUA 2005. CD-Rom ISBN: 9872214301.

- Singh V.P. y Woolisher, D.A.** (2002). “*Mathematical Modeling of Watershed Hydrology*”. Journal of Hydrologic Engineering, ISSN 1084-0699, 7 (4), 270-292.
- Steege, A.; G. Govers; L. Takken; J. Nachtergaele; J. Poesen and R. Merckx** (2001). “*Factors controlling sediment and phosphorous export from two Belgian agricultural catchments*”. Journal of Environmental Quality 30, 1249-1258.
- Stenta, H.; J.P. Rentería y G. Riccardi.** (2005). “*Plataforma computacional para gestión de información en la simulación hidrológica-hidráulica del escurrimiento superficial*”. XX Congreso Nacional del Agua y III Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur, Mendoza. CONAGUA 2005. CD-Rom ISBN: 9872214301.
- Sun, H.; P.S. Cornish and T.M. Daniell** (2002). “*Contour-based digital elevation modeling of watershed erosion and sedimentation: Erosion and sedimentation estimation tool (EROSET)*”. Water Resources Research, Vol. 38, N°11, 1-10.
- Van der Knijff, J. M.; Jones, R.J.A. y Montanarella, L.** (2000) *Soil erosion risk assessment in Italy*. European Soil Bureau. Joint Research Center of the European Commission.
- Van Rompaey, A.J.J.; G. Verstraeten; G. Govers and J. Poesen** (2001). “*Modeling mean annual sediment yield using a distributed approach*”. Earth Surface Processes and Landforms 27, 481-494.
- Verstraeten, G. and J. Poesen** (1999). “*The nature of small-scale flooding, muddy floods and retention pond sedimentation in central Belgium*”. Geomorphology 29, 275-292.
- Wicks, J.M. and J.C. Bathurst** (1996). “*SHESED: a physically based, distributed erosion and sediment yields component for the SHE hydrological modelling system*”. Journal of Hydrology (1996), 175, 213-238.
- Williams J.R.** (1975). “*Sediment yield prediction with universal equation using runoff energy factor*”. Sediment Yield Workshop, USDA Sedimentation Laboratory, pp. 244-252.
- Woolisher, D.A.; R.E. Smith and D.C. Goodrich** (1990). *KINEROS, A Kinematic Runoff and Erosion Model: Documentation and User Manual*. USDA, Agric. Research Service, Rep. ARS-77, Fort Collins, Colorado.
- Young, R.A.; A. Onstad; D. Bosch and P. Anderson** (1987). *AGNPS, Agricultural nonpoint-source pollution model: A watershed analytical tool*. USDA, Conservation Research Report N° 35.
- Zimmermann, E.** (2000) “*Aplicación y Calibración del Modelo SHALL3 en el Sistema Hidrológico del A° Ludueña, Santa Fe, Argentina*”. XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Córdoba. Argentina, IAHR, ISBN 950-33-0267-6, Vol. II, pp. 713-722.

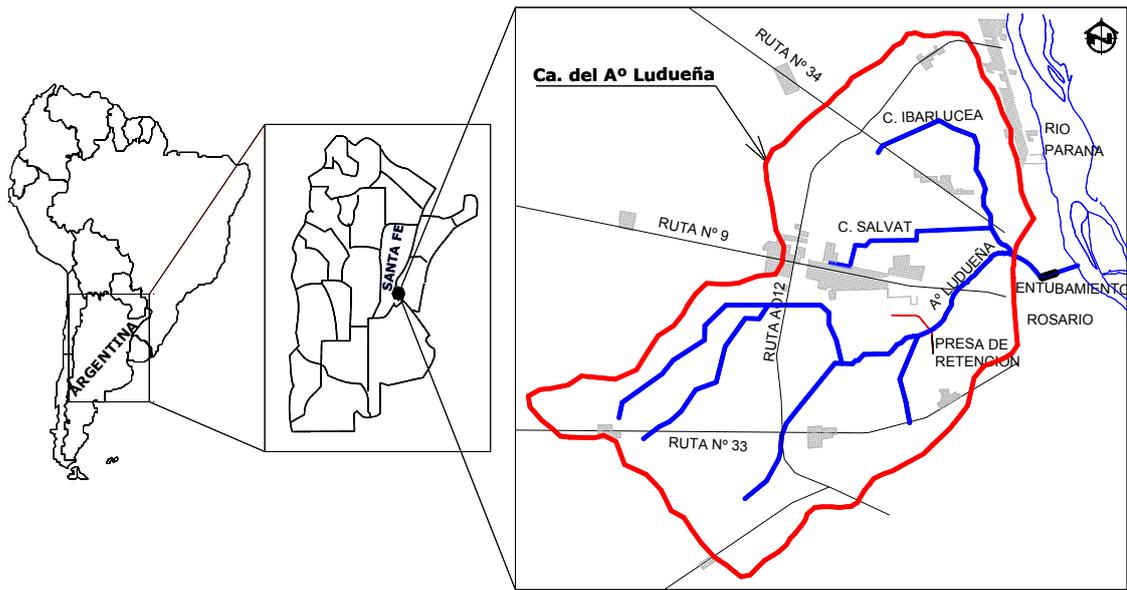


Figura 1. Cuenca del A° Ludueña, Santa Fe, Argentina.

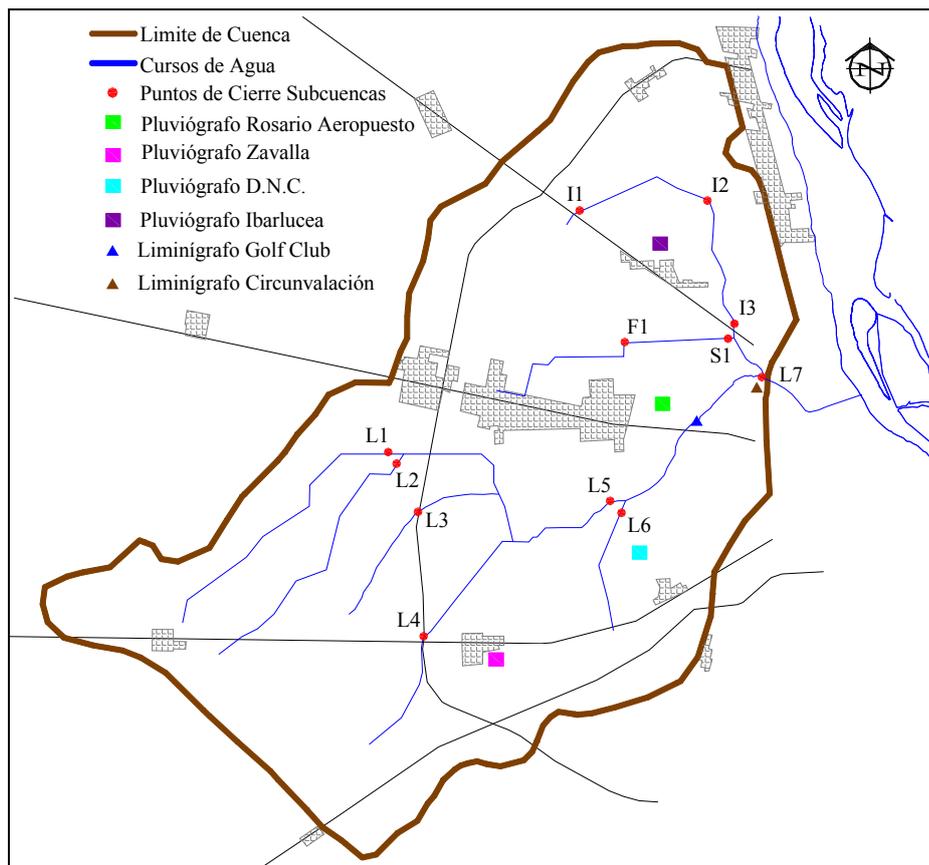


Figura 2. Indicación puntos de cierre de las subcuencas para evaluación de erosión y estaciones de medición.

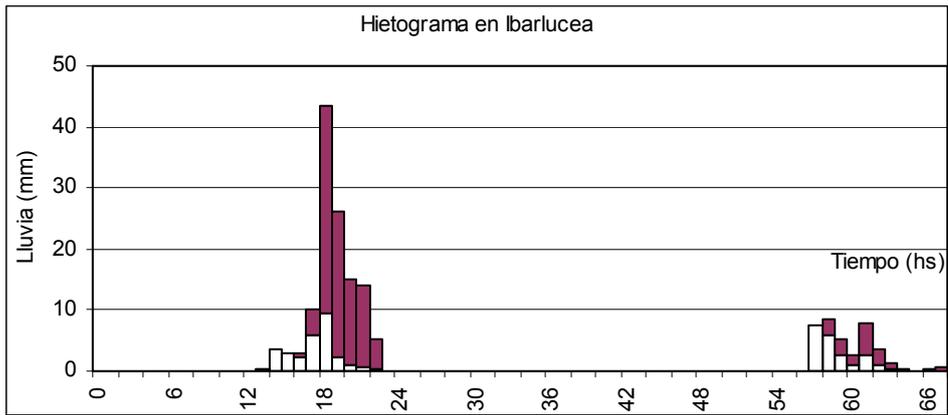


Figura 3. Hietograma en Ibarlucea. Lluvia total:  $(124 + 38)$  mm = 162 mm.

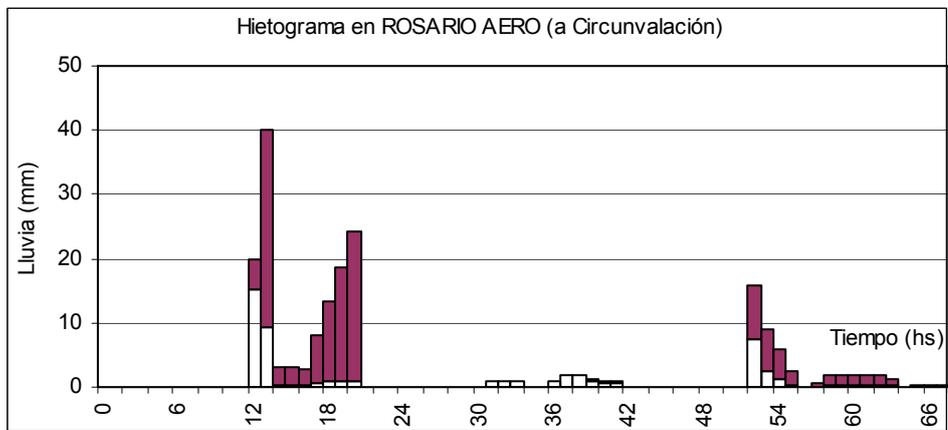


Figura 4. Hietograma en Rosario Aero (a Circunv.). Lluvia total:  $(133,2 + 45,6)$  mm = 178,8 mm.

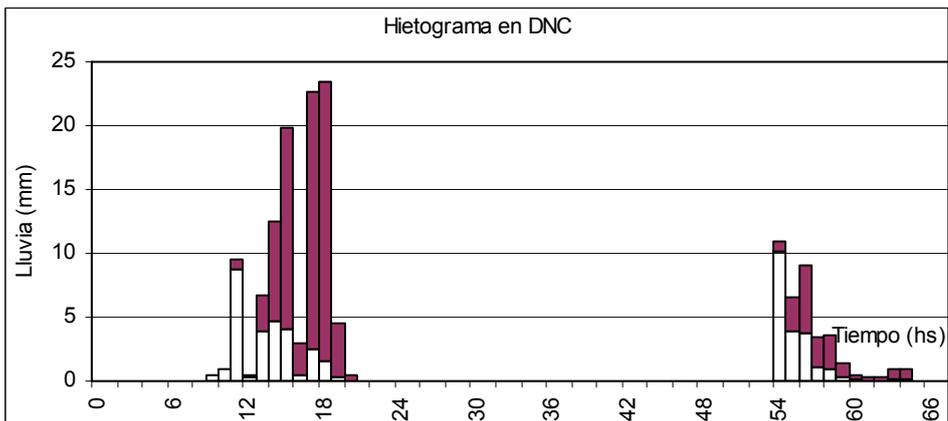


Figura 5. Hietograma en Despacho Nacional de Cargas. Lluvia total:  $(104,5 + 38)$  mm = 142,5 mm.

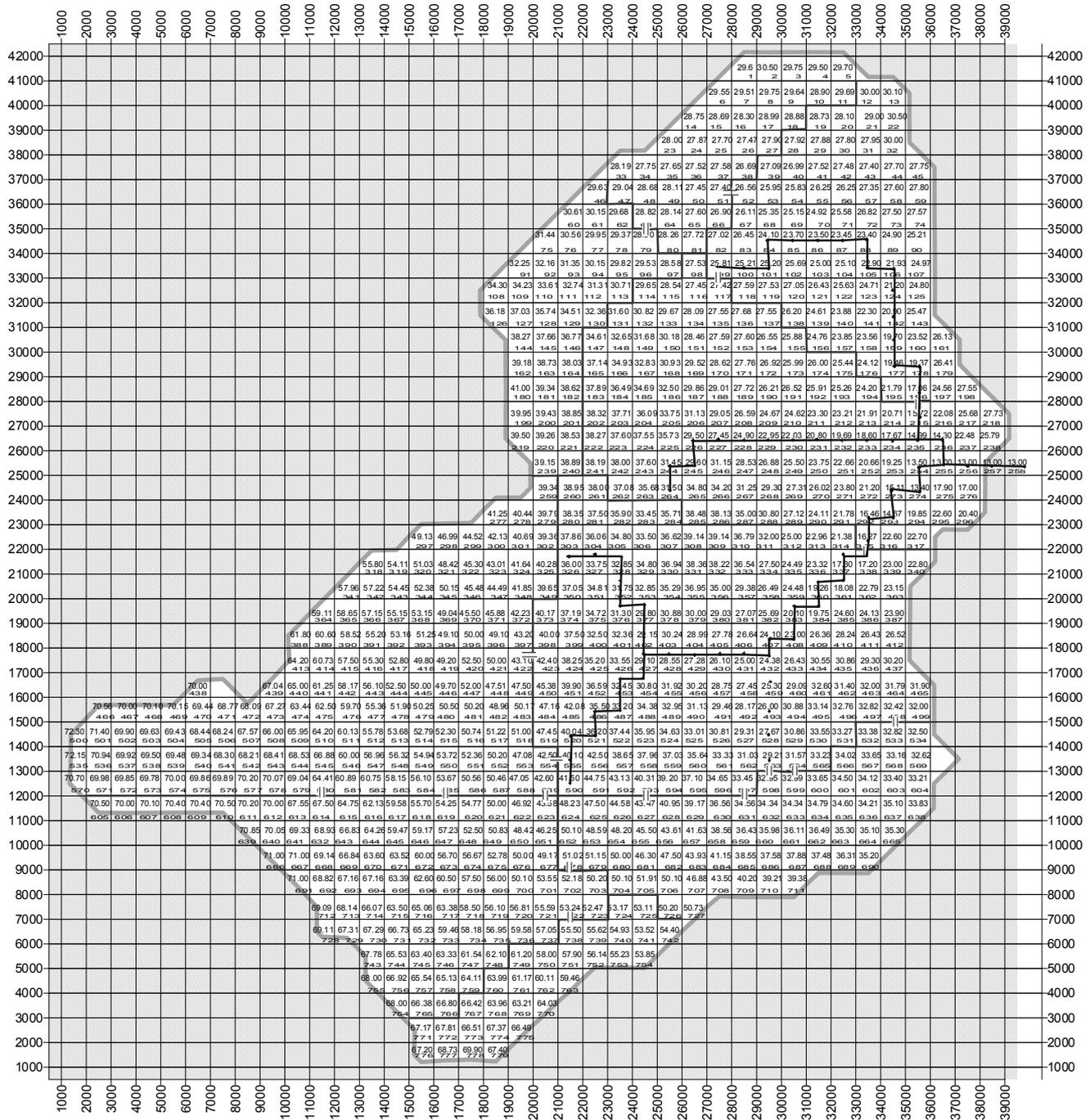


Figura 6. Constitución del modelo.

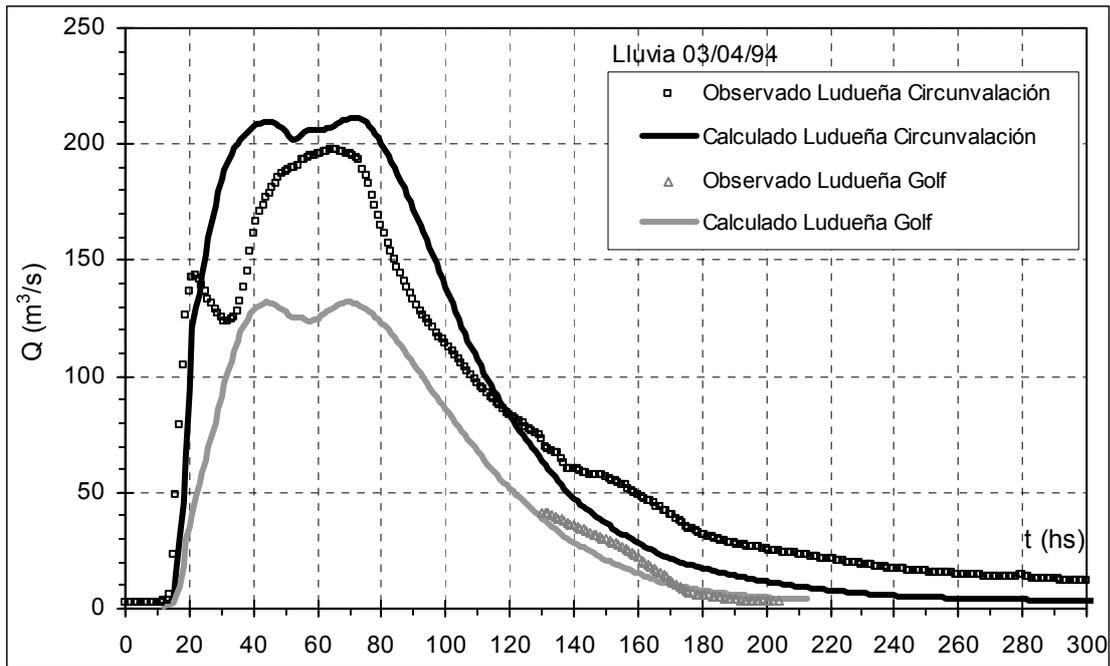


Figura 7. Hidrogramas observados y calculados en Av. Circunvalación y Golf Club. Evento del 03/04/1994.

Tabla 1. Caudales picos, volúmenes de escurrimiento, producción neta y producción neta específica de sedimentos para cada subcuenca durante el evento del 03/04/1994.

Subcuenca	$Q_p$ ( $m^3/s$ )	$V$ ( $m^3$ )	SY (T)		SY'(T/Km <sup>2</sup> )	
			Real	Potencial	Real	Potencial
F1	35,2	5040237	5150	28643	215	1198
S1	44,9	9145076	8907	42693	410	1967
I1	5,20	1499364	1429	6058	21	88
I2	22,2	7686184	6185	31536	81	411
I3	21,1	6119431	4322	24455	92	523
L1	12,9	2494420	2707	11523	34	146
L2	37,9	4805139	7552	29727	164	645
L3	4,50	934186	865	3580	20	81
L4	20,9	3401675	3169	15605	60	297
L5	29,4	7507688	6298	31109	65	322
L6	33,1	5561814	5163	26254	55	279
L7	80,3	21860254	12010	112016	181	1692

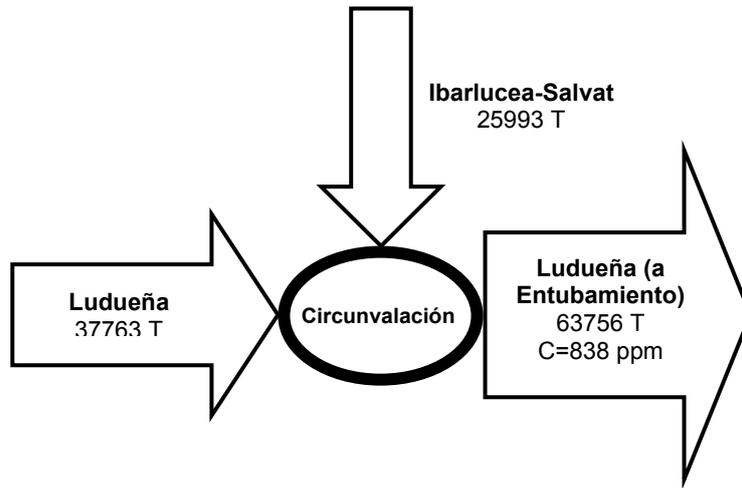


Figura 8. Aporte de sedimentos provenientes del A° Ludueña y del canal Ibarlucea-Salvat durante el evento de crecida del 03/04/1994 considerando erosión real.

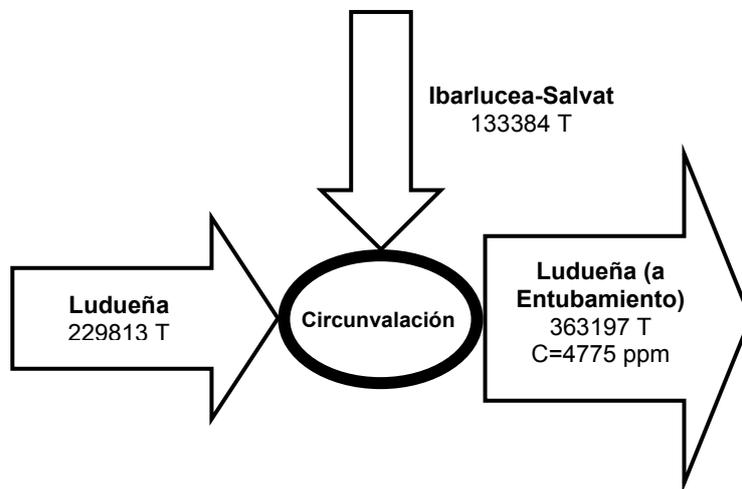


Figura 9. Aporte de sedimentos provenientes del A° Ludueña y del canal Ibarlucea-Salvat durante el evento de crecida del 03/04/1994 considerando erosión potencial.