

La determinación de la distribución areal del aporte de escurrimiento superficial en cuencas de llanura

Gerardo A. Riccardi ^{(1),(4)}, **Hernán R. Stenta** ^{(2),(4)}, y **Juan P. Rentería** ⁽³⁾

⁽¹⁾Consejo de Investigaciones Universidad Nacional de Rosario (CIUNR)

⁽²⁾Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

⁽³⁾Departamento de Hidráulica. FCEIA. UNR

⁽⁴⁾Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales. FCEIA. UNR
Riobamba 245 bis, (2000) Rosario, Argentina. Telefax: 0341 4808541.

riccardi@fceia.unr.edu.ar

Resumen: La incidencia de los diferentes aportes superficiales proveniente de unidades areales elementales sobre los mayores caudales del hidrograma saliente durante una tormenta en una cuenca, es notablemente disímil dependiendo de características morfológicas e hidrológicas de la superficie de escurrimiento. El conocimiento y la apropiada definición de las áreas con mayor influencia en el hidrograma producido por una cuenca, es de particular importancia entre otros factores para la definición tanto de los requerimientos de la información básica topográfica hidrológica como de la toma sistemática de datos hidrometeorológicos con especial énfasis cuando se trata de modelación físicamente basada a tiempo real como es el caso de modelaciones en sistemas de alerta. El análisis de sensibilidad de los aportes elementales en el hidrograma de salida puede estimarse a partir de la simulación de escurrimiento superficial mediante modelos distribuidos con adecuado nivel de detalle. En este sentido el trabajo aquí presentado describe la determinación de la incidencia del escurrimiento superficial proveniente desde áreas elementales de 1 km² en dos cuencas de llanura del sur de la provincia de Santa Fe. Las cuencas en estudio fueron la de los arroyos Ludueña y Saladillo con extensiones superficiales de 700 y 3100 km² respectivamente. Con el objeto de focalizar en la descripción de la mecánica de propagación del escurrimiento no se considera la variabilidad de la generación de escurrimiento, es decir la variabilidad de los procesos de precipitación y pérdidas escurrimiento como intercepción e infiltración. Para llevar a cabo el trabajo se realizaron un número de simulaciones igual a la cantidad de áreas elementales en que se discretizaron las cuencas, suprimiendo en cada simulación el aporte de cada área elemental. Para determinar la influencia de cada área elemental se compararon los hidrogramas salientes generados a partir de la lluvia parcial y el generado a partir de la lluvia completa. El procesamiento de los resultados ha permitido la clara delimitación espacial de las áreas con mayor aporte de escurrimiento superficial en cada ordenada temporal del hidrograma saliente.

Palabras clave: sensibilidad, aporte superficial, modelos distribuidos, Ludueña, Saladillo.

INTRODUCCIÓN

Los primeros abordajes en la descripción de la respuesta hidrológica en cuencas se centraron en la generación de información en las secciones de control o punto de salida de la cuenca, no determinándose en su interior parámetros de flujo físicamente reales como alturas, velocidades y caudales. A través del avance del conocimiento y del mejoramiento y la intensificación de la obtención de datos, hoy día se cuenta con modelos y estructuras de simulación que permiten desagregar la mayoría de los procesos hidrológicos intervinientes en la transformación lluvia-caudal en unidades espaciales pequeñas. En este camino es posible describir los mecanismos predominantes en el escurrimiento y almacenamiento superficial a nivel de parcelas rurales generando en las simulaciones hidrológicas-hidráulicas de la transformación lluvia caudal, no solo información en el punto de salida sino, con igual precisión, información en todas las unidades de discretización de la cuenca. Esta potencialidad de descripción de los fenómenos es de fundamental importancia en los sistemas hidrológicos de llanura donde los problemas atinentes al control de inundaciones no sólo se presentan en los puntos de salida de las cuencas, sino además en todo su interior. La descripción en tiempo real y la posibilidad de rápidas adaptaciones de la representación del sistema hídrico ante modificaciones naturales y antrópicas es de vital importancia para los sistemas de alerta.

Los modelos matemáticos hidrológicos-hidráulicos han sido desarrollados, entre otros objetivos, para mejorar el conocimiento y descripción de los procesos involucrados en la generación de excedentes superficiales a partir de complejos mecanismos presentes en cuencas. Idealmente los modelos de escurrimiento superficial deben captar la esencia de los controles físicos del suelo, la vegetación y la topografía sobre la producción de escurrimiento. En la actualidad, están disponibles una extensa variedad de modelos hidrológicos (Singh y Wollhiser, 2002) y una de las más amplias clasificaciones que se pueden hacer de los mismos es agruparlos en modelos de parámetros puntuales (MPP) y de parámetros distribuidos (MPD) (Johnson, 1993, Chow et al., 1994).

A partir de la disponibilidad y manejo apropiado de información rasterizada (mayormente mediante sistemas de información geográfica) los MPD han sido objeto de nuevos e incesantes desarrollos. La potencialidad sobre la simulación hidrológica que ha generado la extraordinaria capacidad de manejo y gestión de datos que proporcionan los SIGs y los soportes informáticos actuales, es claramente notable. No obstante surgen cuestiones de escala de modelado hidrológico y variaciones en los resultados de las simulaciones matemáticas originadas en la consideración de diferentes grillas espaciales de modelación, lo cual constituyen por si mismo sendos temas de investigación (Stenta y Riccardi, 2005; Stenta et al., 2007). La dimensión de la grilla utilizada en los modelos basados en rasters involucrará la representación general de la variabilidad espacial (Julien et al., 1995; Walker y Willgoose, 1999).

Este trabajo puede enmarcarse dentro de la modelación distribuida de escurrimiento superficial. En este marco, se intenta aportar conocimiento en la desagregación de la procedencia del flujo que escurre por cualquier sección de control dentro de una cuenca

de llanura (internas o externa). La técnica desarrollada ha permitido cuantificar los aportes individuales de todas las unidades de discretización espacial (celdas) que en un determinado tiempo (desde comenzado el escurrimiento directo) están contribuyendo al escurrimiento en una sección de control dada. El estudio se ha focalizado en el mecanismo de escurrimiento superficial a partir de una misma señal de entrada en cada elemento del dominio espacial (misma lluvia neta). El objetivo del trabajo fue la determinación espacio-temporal del aporte de escurrimiento directo en toda sección de control de la cuenca que al menos tenga más de 10 celdas tributarias, la definición de región de aporte con mayor incidencia en los caudales máximos originados en la sección de salida de la cuenca y la definición de una matriz espacio temporal de incidencia de aporte en vistas a su posible utilización como herramienta de predicción expeditiva y aproximada de caudales máximos y tiempos al pico.

DESARROLLO DEL TRABAJO

Metodología

La metodología y tareas llevadas a cabo pueden sintetizarse en los siguientes pasos:

- (a) Definición de tormentas de estudio.
- (b) Fijación de condiciones de cobertura y estado de humedad inicial de la cuenca.
- (c) Simulación de transformación lluvia-caudal considerando la tormenta en toda la cuenca. Determinación de hidrogramas en la secciones de análisis.
- (d) Simulaciones de transformación lluvia-caudal considerando una lluvia que precipita en todo el ambiente espacial excepto en la celda en que se analiza la incidencia..
- (e) Comparación entre hidrograma de lluvia completa y los correspondientes a las lluvias parciales.
- (f) Determinación de incidencia del aporte de escurrimiento superficial de cada celda para distintas coordenadas temporales de interés (4hs, 6 hs, 12 hs, 24 hs, 36 hs, 48 hs, 72 hs y 100 hs)

El modelo de simulación hidrológica-hidráulica

El modelo utilizado en las simulaciones se trata del CTSS8 (Riccardi, 2000; Riccardi et al. , 2002), que se trata de un modelo físicamente basado con aptitud para la modelación hidrológica-hidráulica cuasi-2D en ambientes rurales y urbanos. El sistema de modelación está basado en esquemas de celdas interconectadas. 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. 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.

Las cuencas en estudio

Las cuencas en estudio fueron la de los arroyos Ludueña y Saladillo, ambas ubicadas en el sureste de la provincia de Santa Fe. Asimismo y afluentes del río Paraná. Ambas cuencas presentan características de sistemas hídricos de llanura y las desembocaduras de estos sistemas hídricos se ubican dentro del distrito Rosario, en el caso del Ludueña desembocando en el río Paraná en la zona norte de Rosario y el Saladillo en la zona sur. La precipitación media anual en ambas cuencas se ubica en aproximadamente 950-1000 mm anuales distribuida mayormente entre los meses de octubre a abril.

Cuenca del Arroyo Ludueña (Figura 1): la red de cursos permanentes (cursos naturales y canales) es de aproximadamente 125 km., el área en estudio es de 700 km² con una pendiente media de 1,0 ‰. El caudal base del arroyo es de 0,50 m³/s, en tanto que en crecidas ordinarias se alcanzan los 80 m³/s y en extraordinarias (R>50 años) caudales superiores a 400 m³/s. La altimetría de la cuenca se define entre los 70 m a 18 m IGM.

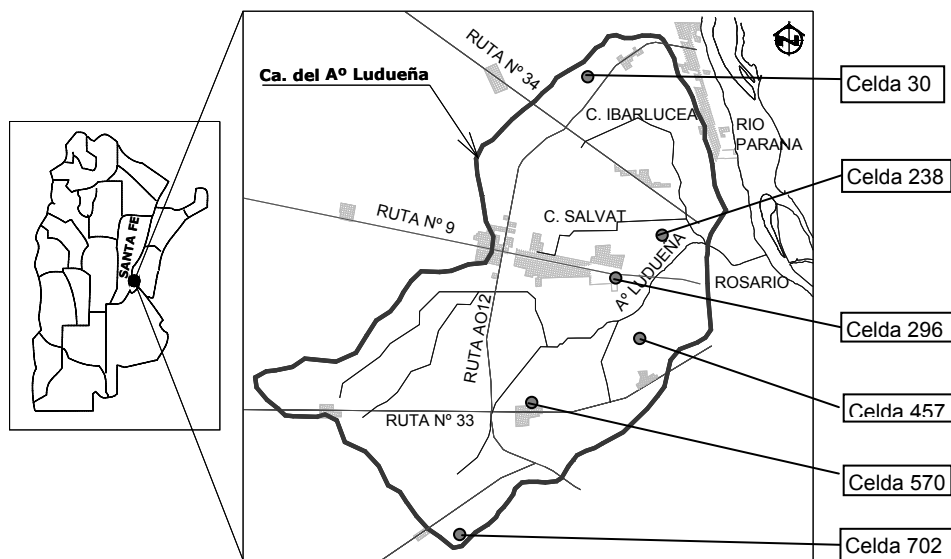


Fig. 1. Cuenca del Arroyo Ludueña

Cuenca del Arroyo Saladillo (Figura 2): posee aproximadamente 3200 km² de extensión superficial. La longitud del curso principal es más de 160 km, totalizando entre todos los cursos permanentes una longitud de 350 km. Los caudales para lluvias de recurrencias ordinarias están en el rango de 200-300 m³/s, en tanto que para R = 50 años el caudal esperable es del orden de 1200 m³/s. El arroyo Saladillo recorre la provincia de oeste-sudoeste a este-noreste, su pendiente media es de 0.6 m/km, verificándose en ciertos

sectores pendientes de hasta 10 m/km. Altimétricamente está ubicado entre cotas 120 y 20 m IGM.

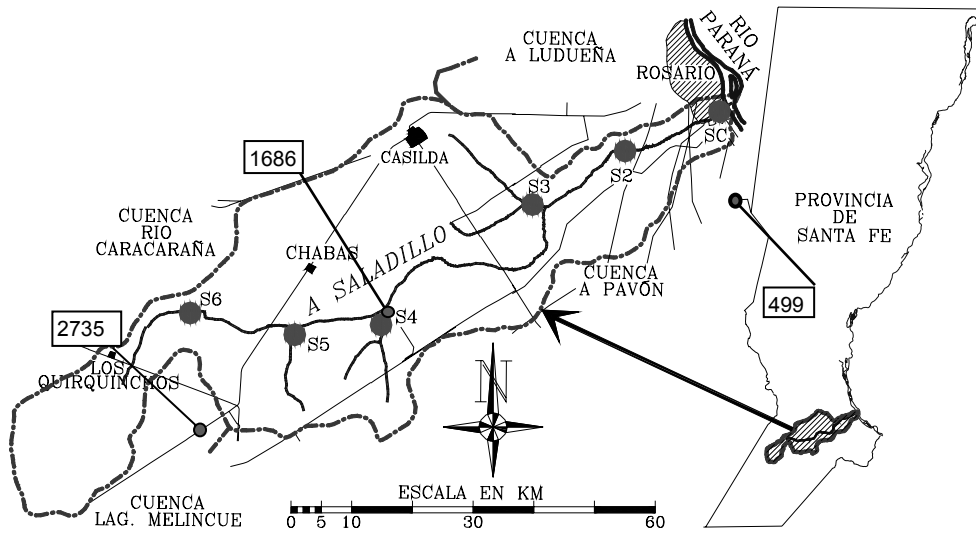


Fig. 2. Cuenca del Arroyo Saladillo

En la Tabla 1 se presentan una síntesis de las características físicas de las cuencas con influencia directa en la respuesta hidrológica: Completando la información física de las cuencas se presentan las respectivas curvas hipsométricas en la Figuras 3 (a) y (b).

En lo que concierne al tiempo de concentración la cuenca del arroyo Ludueña tiene un $t_c \approx 120$ hs en tanto que a la cuenca del arroyo Saladillo le corresponde un $t_c \approx 300$ hs.

Tabla 1. Características Físicas Arroyos Ludueña y Saladillo

	Ao. Ludueña	Ao. Saladillo
Área (km ²)	701	3151
Perímetro (km)	122	1340
Pendiente Media curso principal (‰)	1.0	0.6
Cota máxima IGM valle (m)	18	20
Cota mínima IGM valle (m)	70	120
Longitud de cursos permanentes (km)	125	345
Índice de Compacidad (adim)	1.300	6.734
Densidad de Drenaje (km/km ²)	0.178	0.109

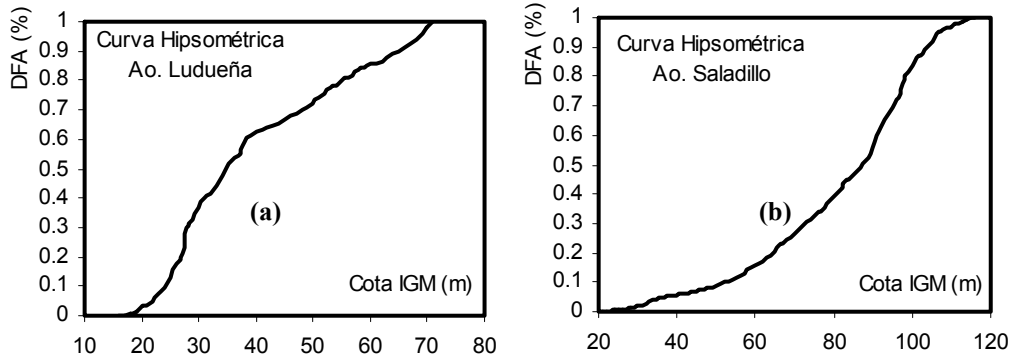


Fig. 3. Curvas Hipsométricas. (a) Arroyo Ludueña; (b) Arroyo Saladillo

Las tormentas consideradas y pérdidas de escurrimiento: las tormentas consideradas correspondieron a pulsos unitarios discretos de 2hs de duración, con valores semejantes a observadas en la zona en estudio y estuvieron comprendidas entre los 60 a 120 mm de lluvia total distribuidas espacialmente en forma uniforme. Las pérdidas de escurrimiento fueron definidas en base al método del número de curva (SCS, 1975) fijándose un $CN = 75$, lo que determinó valores de lluvias netas entre 15 y 57 mm aproximadamente.

Constitución del modelo de simulación: en ambas cuencas fue considerada una grilla espacial de 1000 m x 1000 m. En el arroyo Ludueña la discretización resultó en 701 celdas y 1324 vinculaciones, En el sistema hídrico del arroyo Saladillo el modelo se constituyó con 3153 celdas y 6085 vinculaciones. En ambas cuencas las condiciones de borde aguas abajo correspondieron a relaciones altura-caudal en puentes cercanos a la desembocadura en el río Paraná. Todos los coeficientes de resistencia al escurrimiento utilizados tanto en el curso principal, en el valle de inundación y en las obras de arte (puentes y alcantarillas) fueron los establecidos en trabajos de modelación antecedentes realizados por los autores (Zimmermann et al., 1993, Riccardi et al., 2002, Stenta y Riccardi, 2005, Stenta et al., 2006; Renteria et al. 2006).

Determinación de la incidencia del aporte de escurrimiento superficial: para establecer la incidencia del escurrimiento superficial en una determinada sección de control se realizó en primer lugar una simulación con todas las celdas aportando escurrimiento y definiendo un hidrograma de aporte completo de la cuenca en la sección. Posteriormente se realizaron tantas simulaciones como celdas comprendía el modelo y en cada una de estas simulaciones se eliminó el aporte de escurrimiento de cada una de las celdas, generando de esta manera el hidrograma por ejemplo sin el aporte de la celda i (con $i = 1$ a número de celdas). La diferencia en cada ordenada temporal entre el hidrograma con el aporte de la cuenca completa y el hidrograma sin el aporte de la celda i fue considerada como la incidencia directa del aporte de esta celda.

La incidencia así definida se ha analizado en dos caminos:

- (a) análisis de todas las diferencias calculadas a partir de la eliminación del aporte de cada celda *i* del modelo en una dada coordenada temporal del hidrograma; en el presente estudio se eligieron como coordenadas temporales de análisis las correspondientes a 4, 6, 12, 24, 36, 48, 72 y 100 hs
- (b) análisis en cada celda *i* del modelo, observando la distribución temporal de las diferencias de caudales calculados.

Resultados en el arroyo Ludueña: si bien se realizaron simulaciones de transformación lluvia-caudal con diferentes tormentas a los efectos ilustrativos se presentan los resultados correspondientes a una lluvia neta de 40 mm. El hidrograma generado en la sección de control tipificada Pte. Circunvalación se presenta en la Figura 4, puede caracterizarse con un caudal máximo de 90 m³/s con un tiempo al pico de alrededor de 20-24 hs y un tiempo de base superior a las 120 horas. En la Figura 6 se presentan los mapas rasterizados de las celdas de la cuenca que aportan el 95% del escurrimiento superficial para las ordenadas temporales analizadas. Completando los resultados se muestra en la Tabla 2 la cantidad de celdas y entre paréntesis el porcentaje del área total que aportan el 95%, 85% y 50% del escurrimiento en cada ordenada temporal. La secuencia de mapas permite claramente observar como evoluciona temporalmente las áreas de aporte predominante

Tabla 2. Incidencia del aporte de escurrimiento en el Arroyo Ludueña

Tiempo (h)	4	6	12	24	48	100
95% del aporte	72 (10.3)	118 (16.8)	206 (29.3)	346 (49.3)	514 (73.2)	399 (56.8)
85% del aporte	41 (5.8)	72 (10.3)	148 (21.1)	267 (38.1)	403 (57.4)	307 (43.7)
50% del aporte	15 (2.13)	29 (4.1)	64 (9.1)	128 (18.2)	181 (25.8)	144 (20.5)

Es de especial interés a los efectos de la mitigación de inundaciones urbanas en la ciudad de Rosario la caracterización del escurrimiento en los tiempos cercanos al de presentación de los caudales máximos. Si tenemos en cuenta que la presentación del caudal pico se produce en la ordenada 24 hs (tener en cuenta que el 0 del eje temporal corresponde al inicio de la lluvia neta) se puede establecer que aproximadamente el 50% de la cuenca está aportando en el momento de tal presentación en tanto que la ubicación territorial de la zona de aporte corresponde a la presentada en la Figura 4(d). Cabe destacar que dentro de cualquiera de las zonas de aporte establecidas para cada ordenada temporal es posible desagregar cada mapa en las subzonas de porcentajes de aporte que se desee. En el caso de $t = 24$ hs mientras la mitad de la cuenca contribuye al 95% del caudal máximo, solo un 38% contribuye al 85% de dicho caudal y un 18% del área de la cuenca a la mitad el caudal máximo.

Para ilustrar la evolución del aporte de cada celda se presenta en la Figura 5 las variaciones de aporte en 6 celdas del dominio espacial que contribuyen mayormente en distintos tiempos. La ubicación de cada celda esta referida en la Figura 1. Claramente puede verse como las celdas muy cercanas a la rama Ludueña del sistema hídrico (celdas 238, 296 y 457) producen su máximo aporte antes de $t = 24$ hs, en tanto que celdas

emplazadas a una relativamente importante distancia del curso principal (570 y 30) producen el máximo de aporte entre las 30 y 60 horas y una celda muy alejada del curso principal y de cursos permanentes (701) produce su aporte máximo mas allá de las 100 hs de comenzado el escurrimiento de la lluvia neta.

Puede destacarse que ante este pulso discreto de lluvia (muy inferior al tiempo de concentración) un comportamiento hidrodinámico de la cuenca compatible fundamentalmente con la compacidad de su forma ($k_c = 1.30$), fue el hecho que mientras a la hora del caudal máximo aporta aproximadamente el 50% de la cuenca, pasado este tiempo, la cantidad de celdas aportantes continua creciendo hasta alcanzar valores cercanos al 75% del área total de la cuenca cuando se cumplen las 48 hs de comenzado el escurrimiento directo.

Resultados en el arroyo Saladillo: al igual que en el caso anterior los resultados mostrados corresponden a la simulación de transformación lluvia-caudal para una precipitación neta de 40 mm caídos en 2 horas. En la Figura 6 se muestra el hidrograma generado en la sección de control considerada en la cuenca, el caudal máximo es del orden de 540 m³/s, presentando su valor máximo a las 24 hs de comenzada la lluvia neta y un tiempo base superior a las 300 hs.

En la Figura 8 se presentan los mapas del las celdas de la cuenca que aportan el 95% del escurrimiento superficial para las ordenadas temporales de 12 ,24 y 48 hs, en tanto que en la Tabla 3 se detalla la cantidad de celdas y entre paréntesis el porcentaje del área total que aportan el 95%, 85% y 50% del escurrimiento en cada ordenada temporal.

Tabla 3. Incidencia del aporte de escurrimiento en el Arroyo Saladillo

Tiempo (h)	6	12	24	36	48	100
95% del aporte	104 (3.3)	777 (24.6)	1658 (52.6)	1603 (50.9)	1311 (41.6)	818 (26.0)
85% del aporte	66 (2.1)	561 (17.8)	1229 (39.0)	1217 (38.6)	1018 (32.3)	559 (17.7)
50% del aporte	28 (0.9)	252 (8.0)	536 (17.0)	498 (15.8)	436 (13.8)	259 (8.2)

Puede deducirse que el caudal máximo es producido predominantemente por aporte de escurrimiento del 50% de la cuenca. Estas celdas de aporte se ubican mayoritariamente en la cuenca media del arroyo. El escurrimiento en la sección de control para ordenadas temporales de 36 y 48 hs también está aportado por valores cercanos al 50% de la cuenca, aunque como se ilustra en los mapas (Figura 8) no se trata de las mismas celdas. En la Figura 7 se ilustran los aportes individuales de 3 celdas cuyos máximos se presentan a las 12, 24 y 48 hs.

A diferencia de la cuenca anterior, en la cuenca del arroyo Saladillo la cantidad máxima de celdas aportantes simultáneamente en la sección de control no superó el 53%. Se entiende que este mecanismo se manifiesta debido a la forma alargada de la cuenca que se expresa significativamente con el índice $k_c = 6.7$.

Matriz de Incidencia espacio-temporal de celdas: una posible potencialidad del desagregamiento espacio temporal de los aportes la determinación (que deberá constatararse en sucesivas investigaciones) de una matriz de valores de incidencia espacio-temporal de los aportes de escurrimiento proveniente de cada celda en la sección de salida de cada cuenca (o en cualquier sección interna de interés). Para ello se procedió a valorizar el caudal aportado por cada celda por unidad de lámina de lluvia y en cada ordenada temporal. En este marco hipotético el caudal en la sección de salida en el tiempo n producido por una lluvia neta P de 2 horas de duración se ha aproximado con la expresión:

$$Q_{sc}^n = \sum_{j=1}^{icc} C_j^n P_j \quad (1)$$

donde Q_{sc}^n es el caudal en la sección de control en la ordenada temporal n ; C_j^n es el coeficiente de incidencia espacio-temporal; P_j es la lluvia neta de 2 horas de duración que se genera en la celda j ; icc es el número total de celdas que componen el dominio espacial.

El valor de los coeficientes C_j^n fue determinado a partir de las lluvias ensayadas que como se mencionara comprendieron valores de intensidades entre 7.5 a 30 mm/h de 2 horas de duración. La máxima diferencia computada entre los valores del coeficiente en función de las intensidades se fue de un 6 %, por lo que en esta instancia se definió finalmente con el promedio simple fijándose el error porcentual en $\pm 3\%$.

Al momento de escritura del presente artículo se han realizado pruebas de contrastación de resultados en términos de hidrogramas computados al simular el escurrimiento con lluvias variables espacialmente. Por un lado se modelaron escenarios con la lluvia variable mediante el modelo matemático y por otro lado se determinaron los caudales mediante la utilización de la ec.(1). Las intensidades de las lluvias netas en cada celda simuladas fueron entre 0 a 30 mm/h. Los resultados indican que las diferencias en los caudales máximos no superan el 10% en tanto y en cuanto el área sin lluvia neta (sin escurrimiento) no supere aproximadamente la mitad del área de la cuenca.

En términos más generales puede afirmarse que las diferencias de los resultados aumentan cuando el mecanismo global de dispersión hidrodinámica de la cuenca para un escenario de lluvia espacialmente variable dado, se diferencia de aquel en que fueron determinados los coeficientes. Resulta claro que una metodología expeditiva de este tipo para determinar caudales máximos a modo de pronóstico preliminar solo podrá ser utilizable si los coeficientes de incidencia se determinan para estados de la cuenca similares a los cuales se desea aplicar la metodología.

CONCLUSIONES

Se ha presentado una técnica para determinar en un punto dado de una cuenca, la incidencia espacio-temporal del aporte de escurrimiento directo proveniente desde cualquier elemento de la discretización espacial de una cuenca. La técnica se basó en la modelación distribuida mediante un modelo físicamente basado.

La incidencia de cada unidad espacial se midió a partir de la adopción de un escenario donde se produce escurrimiento directo en todas las celdas excepto en la de análisis. De este modo se minimiza la alteración de la dispersión hidrodinámica del conjunto del sistema hídrico.

Las experimentaciones realizadas han abarcado crecidas que prácticamente no han producido desbordes importantes dentro las cuencas, este escenario corresponde a una dispersión de la cuenca asociado a un tránsito hidrodinámico por la red de cursos permanentes mayormente encausado, por lo tanto, el ámbito de aplicación de los resultados debe acotarse precisamente a lluvias con semejanza (duración e intensidad) a las ensayadas.

La incidencia de una celda en una ordenada temporal sobre una sección de control dada y para una lluvia dada se valorizó con un coeficiente C_j^n . Al variar las intensidad de las lluvias entre 7.5 a 30 mm/h en la lluvia neta de 2 horas de duración, la mayor diferencia porcentual hallada en el coeficiente fue de 6%, lo que indica una muy leve variación de la incidencia del aporte al variar la intensidad dentro de los rangos ensayados.

La utilización de los coeficientes de aporte C_j^n para predecir expeditivamente caudales con lluvias variando espacialmente entre 0 y 30 mm/h han indicado que las diferencias en los caudales máximos (calculados por metodología y calculados por modelación) no superan el 10% en tanto y en cuanto el área sin lluvia neta (sin escurrimiento) no supere aproximadamente la mitad del área de la cuenca.

La técnica presentada puede ser utilizada también como herramienta para la determinación de la curva de distribución acumulada de áreas de aporte, curva utilizada en estudios geomorfológico para caracterización de invariantes de escala (La Barbera y Roth, 1994; Perera y Willgoose, 1998; Garcia et al, 2002).

Próximos estudios se orientarán a contrastar la metodología considerando eventos observados con variaciones espacio temporales de las lluvias. Además se proyecta incorporar las variaciones espaciales de las pérdidas de escurrimiento (intercepción, almacenamiento superficial e infiltración) de modo de alcanzar una definición más integral de la incidencia del aporte de escurrimiento superficial de un área.

BIBLIOGRAFÍA

- Chow, V. T., Maidment, D. y Mays, L. (1994), *Hidrología Aplicada*, McGraw-Hill Interamericana, Buenos Aires.
- García, S, García, F. y Andreu Álvarez J. (2002), “*Simulación Hidrológica basada en SIG: Sensibilidad a factores de escala*”, *Ingeniera del Agua*, 9 (3), 295-308.
- Johnson, B. E. (1993). *Comparison of Distributed vs. Lumped rainfall-runoff Modeling Techniques*, Ms. Tesis, Memphis State Univ., Memphis, Tenn.
- Julien P. y., Saghafian, B., and Ogden, F. L. (1995). “*Raster –Based Hydrological Modeling of Spatially-Variied Surface Runoff*”, *Water Resour. Res.* 31(3), 523-535.
- La Barbera, P. and Roth, G. (1994), “*Invariance and Scaling Properties in the Distributions of Contributing AREA AND Energy in Drainage Basins*”, *Hydrological Processes*, 8, 125-135.
- Riccardi G. (2000), “*Un Sistema de Simulación Hidrológica-Hidráulica Cuasi-2D Multicapa para Ambientes Rurales y Urbanos*”, XIX Cong. Latinoamericano de Hidráulica, T II, Córdoba, Argentina, 159-168.
- Riccardi G., Scuderi C. y Stenta H. (2002) “*Modelado de Esgurrimiento Superficial con Alto Nivel de Detalle en Cuenca del Arroyo Ludueña*”, XIX Cong. Nacional del Agua, T33, V. C. Paz, Córdoba, Argentina.
- Rentería J., Stenta H., Riccardi G. y Scuderi C. (2006) “*Análisis de la Respuesta Hidrológica en la Cuenca del Ao Saladillo (STA.FE, ARG.) aplicando dos modelos digitales de terreno.*”, XXII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, 53-HSS-R4116, Ciudad Guayana, Venezuela.
- 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 y III° Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur, ISBN 987-22143-0-1. CD-ROM Cap. Hidrología. T 75, Mendoza.
- Stenta H. Riccardi G. y Basile P. (2006) “*Respuestas Hidrológicas en la Modelación del Esgurrimiento en Cuencas de Llanura con, Diferentes Niveles de Detalle*, 53-HSS-S3117, XXII Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Ciudad Guayana. Venezuela.
- Singh V. and Wollhiser D., (2002) “*Mathematical Modeling of Watershed Hydrology*”, *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE, 7:4 , 270-292.
- Walker, J., Willgoose, G.R. (1999). “*On the Effect of Digital Elevation Model Accuracy on Hydrology and Geomorphology*”. *Water Resour. Res.*, 35, 2259-2268.
- Zimmermann E., Riccardi G. y Navarro R. (1993) *Modelación Matemática Hidrodinámica del Tramo II Arroyo Saladillo*, Departamento de Hidráulica, FCEIA, UNR, Convenio FCEIA – CFI. Rosario.

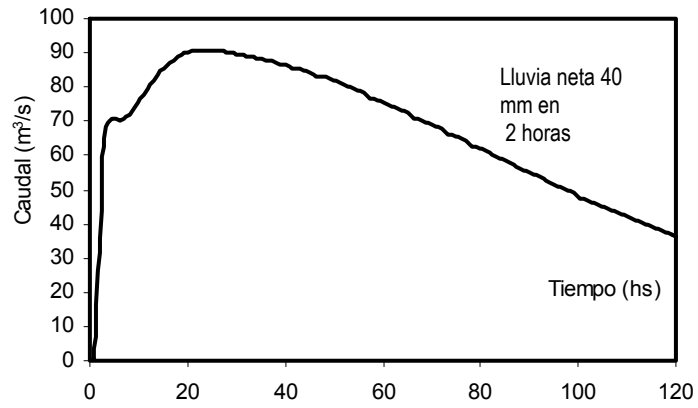


Fig. 4. Arroyo Ludueña. Hidrograma en Sección Puente Circunvalación

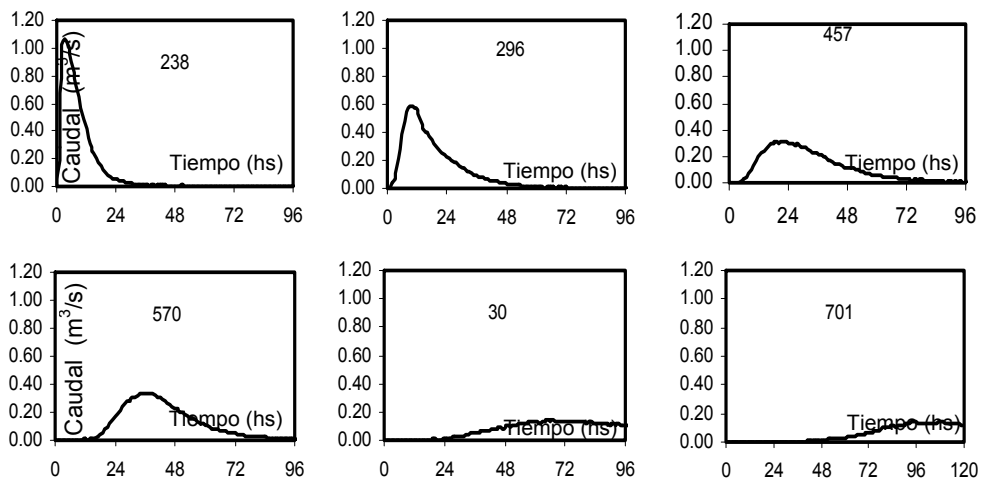
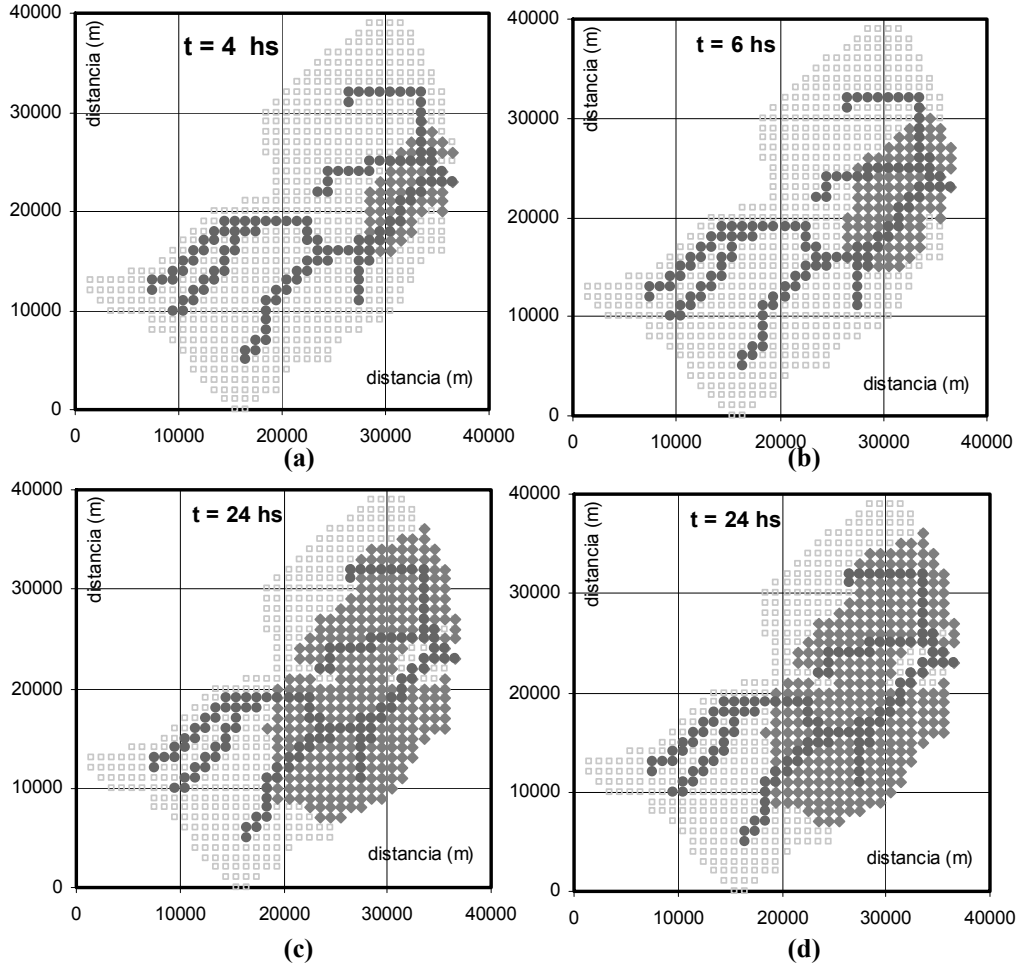


Fig. 5. Arroyo Ludueña. Aporte de escurrimiento desde 6 celdas del dominio espacial



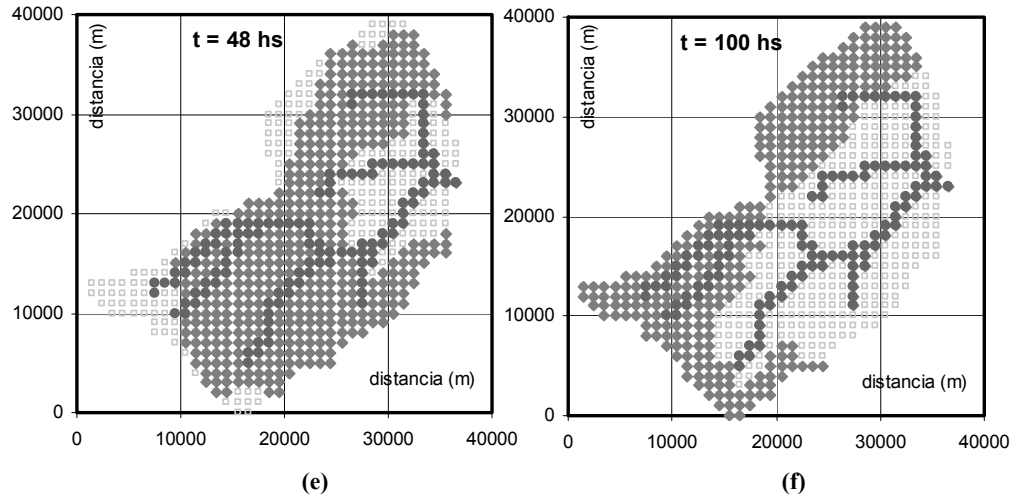


Fig. 6. Mapas de celdas que aportan el 95% del caudal en la ordenada temporal respectiva. (a) 4 horas; (b) 6 horas; (c) 12 horas; (d) 24 horas; (e) 48 horas y (f) 100 horas. (continuación)

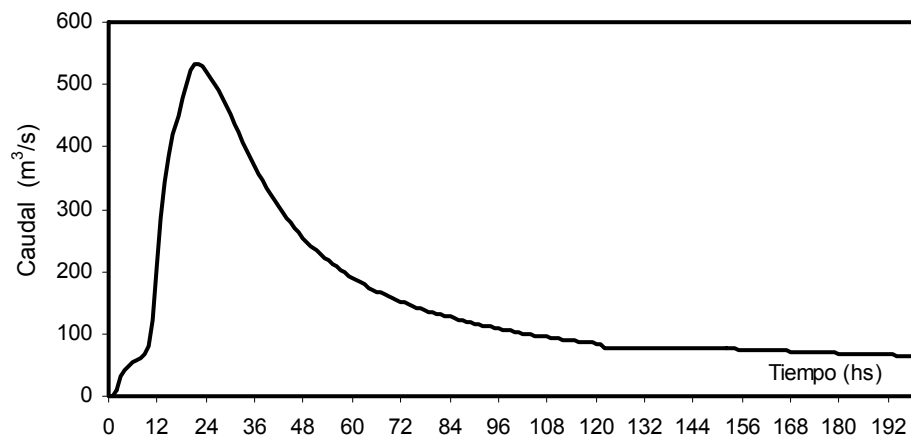


Fig. 7. Arroyo Saladillo. Hidrograma en Sección Puente F.C. Belgrano

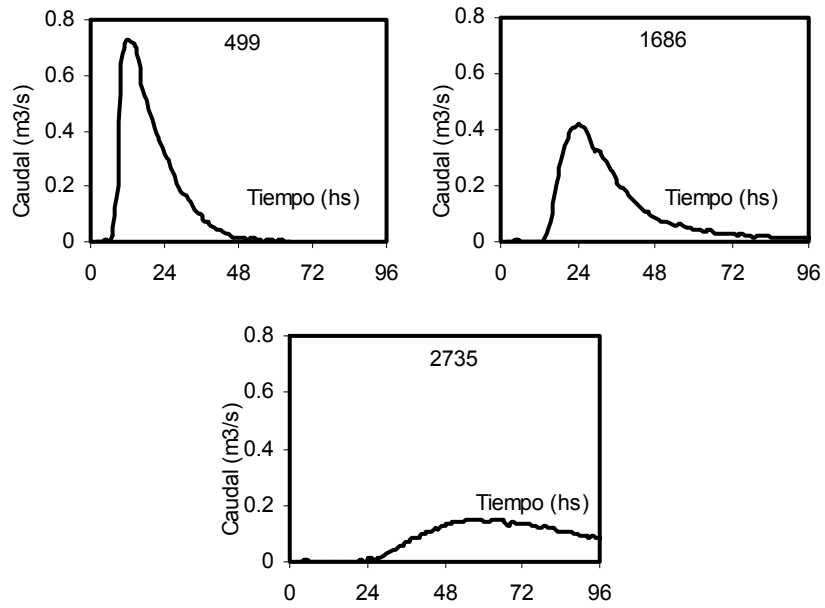
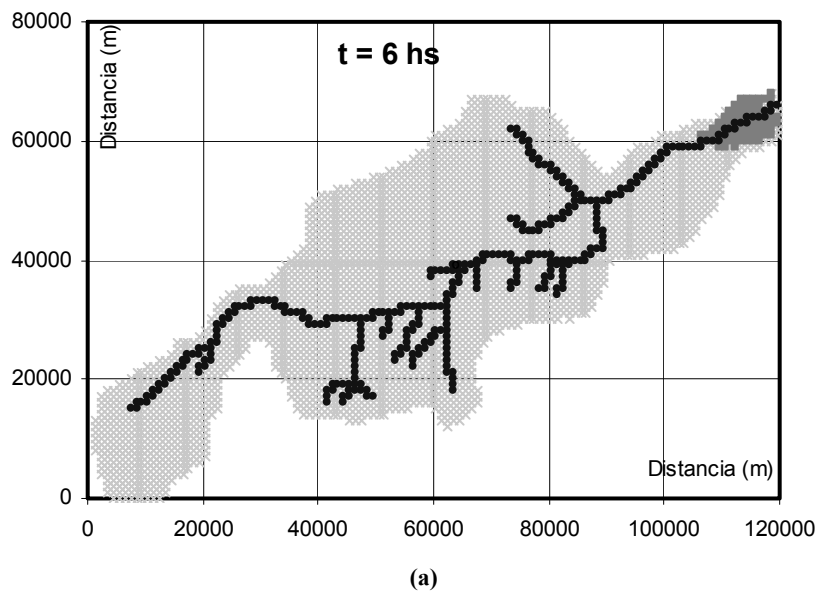
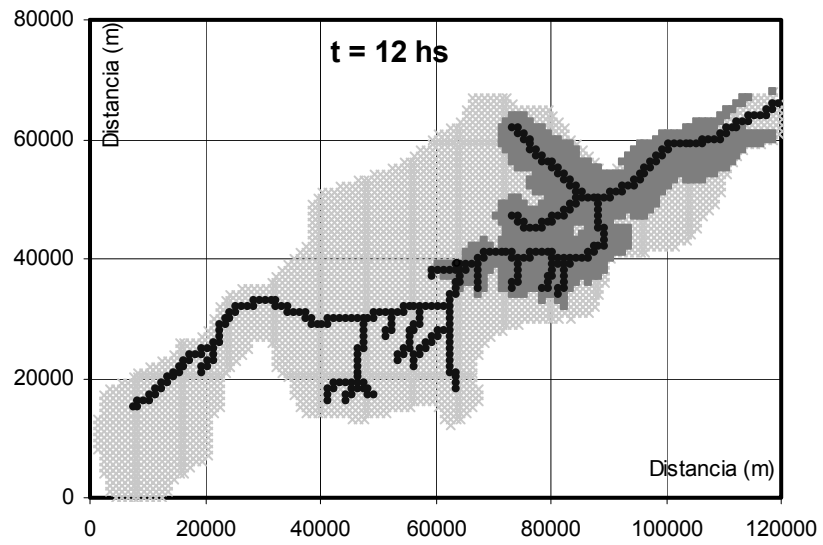


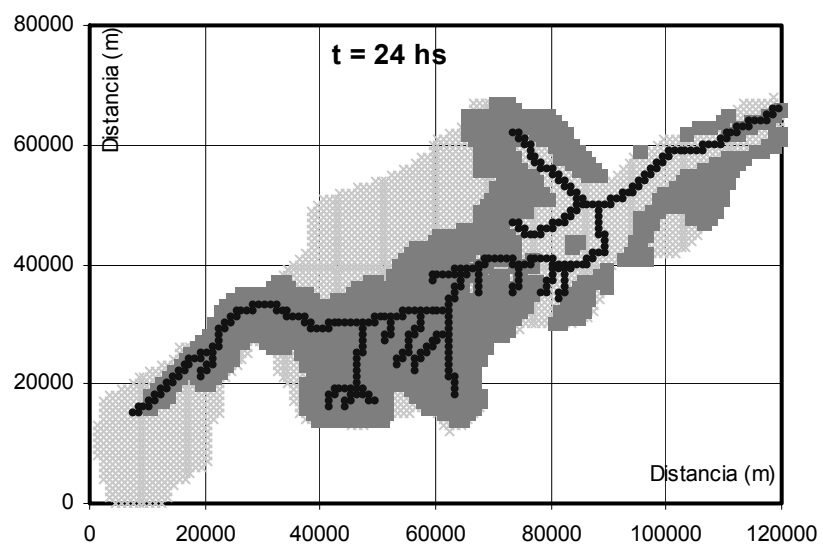
Fig. 8. Arroyo Saladillo. Aporte de escurrimiento desde 3 celdas



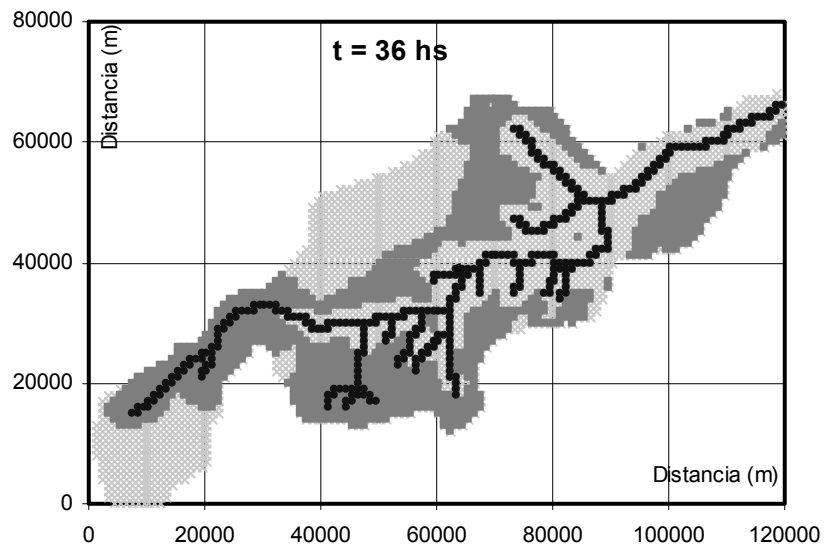
(a)



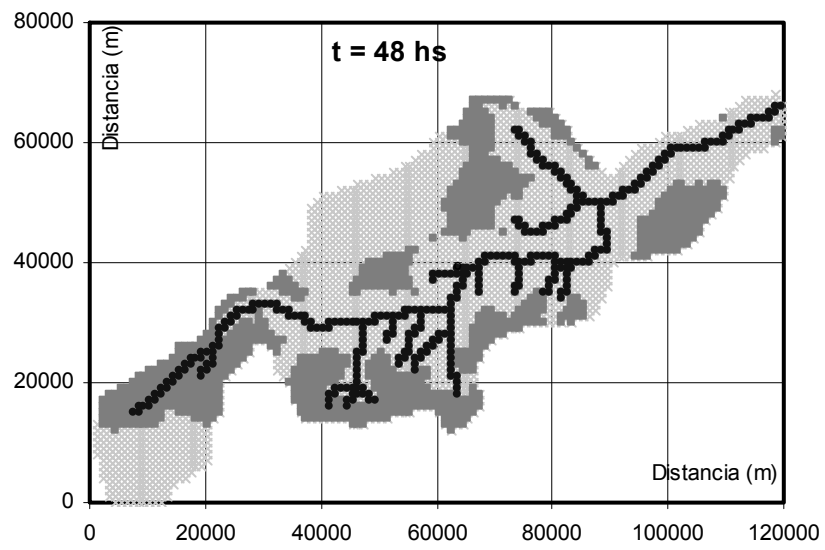
(b)



(c)



(d)



(e)

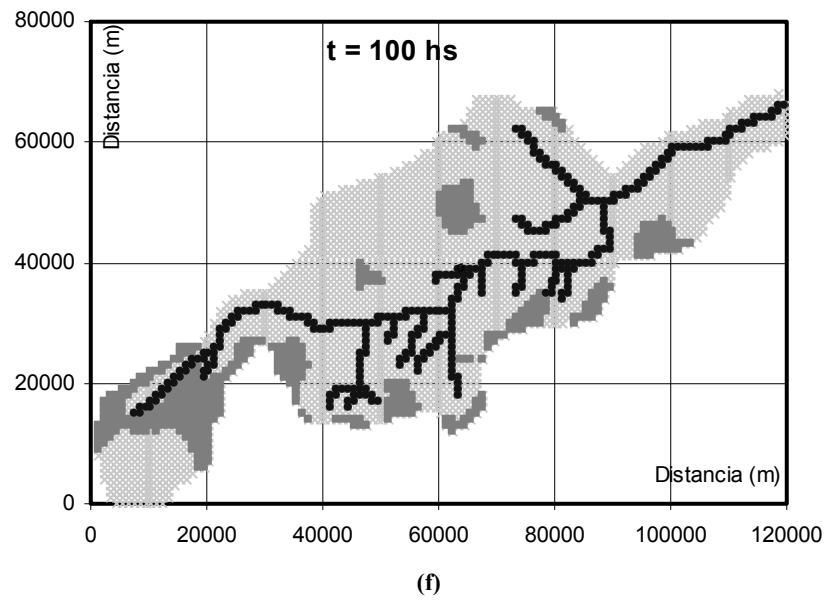


Fig. 9. Arroyo Saladillo. Mapas de celdas que aportan el 95% del caudal en la ordenada temporal respectiva. (d) 36 horas; (e) 48 horas, (f) 100 horas