

XIX CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA – CÓRDOBA 2000

UN SISTEMA DE SIMULACION HIDROLOGICA-HIDRAULICA CUASI-2D MULTICAPA PARA AMBIENTES RURALES Y URBANOS

Gerardo Adrián Riccardi

Investigador Consejo de Investigaciones Universidad Nacional de Rosario. CURIHAM. FCEIA. UNR
José Hernandez 986. 2000 Rosario. Argentina. e_mail: riccardi@fceia.unr.edu.ar

RESUMEN

Se presenta un sistema de simulación hidrológica-hidráulica cuasi-bidimensional multicapa. El sistema resulta apto para la modelación de los procesos hidrológicos dominantes involucrados en la transformación lluvia-caudal en ambientes rurales y urbanos. La estructura de modelación esta basada en los conocidos esquemas de celdas interconectadas, con el agregado original de un amplio espectro de leyes de vinculación que permiten la simulación de escurrimiento en capas, tanto superficial como por redes subterráneas de conductos cerrados. Los objetivos planteados en la actual etapa de desarrollo del sistema fueron : abarcar distintas escalas de drenaje pluvial rural y urbano desde drenaje domiciliario, por calles, cuencas de emisarios o cuencas de ríos y cubrir diferentes niveles de detalle, desde subdivisiones en amplias subcuencas rurales con una resolución de 0,10 elementos/km² hasta detalle a nivel de drenaje por calle y domiciliario con resoluciones del orden de 1000 elementos/ km². En este documento se expone el marco conceptual del sistema de modelación y una serie de aplicaciones de relevancia. Los resultados obtenidos fueron altamente satisfactorios, demostrando una adecuada capacidad de reproducción del proceso real de transformación lluvia-caudal con escurrimiento cuasi-bidimensional en capa individual como así también en dos capas interconectadas.

ABSTRACT

The state of development of a hydrological-hydraulic quasi-2D multilayer simulation model is presented. It models the dominant hydrological processes involved in the rainfall-runoff transformation in rural and urban environments. The modelling structure is based on the well-known schemes of interconnected cells, with the original addition of a large set of linking laws. These allow the flow simulation in both surface runoff and networks of closed conduits. The two original objectives achieved at this state of development were: to embrace different scales of rural and urban storm drainage from streets to river basins; and to cover different levels of detail, from river basins with a resolution of 0.10 elements/km² to drainage micro basin with 1000 elements / km². The conceptual model and a synthesis of several applications of relevance are exposed in this work. The results obtained were entirely satisfactory, showing an appropriate capability of reproduction of the real process of rainfall-runoff transformation flowing in a single layer (surface runoff) and in two interconnected layers (surface runoff and networks of closed conduits).

INTRODUCCION

Los procesos involucrados en la transformación lluvia-caudal en ambientes rurales y urbanos han sido ampliamente estudiados por científicos para el desarrollo del conocimiento y por ingenieros para el diseño hidráulico de diversas obras componentes de sistemas de drenaje y saneamiento. Existen un gran número de sistemas de modelación de calidad reconocida que permiten la representación de tales procesos, entre los más importantes : SWMM (11); HEC-1 (12); ILLUDAS (21); TR55 (23); OTTHYMO (24), S11S (1) (10) y MOUSE (8); MIKE11 (7); CEDRE (3) MARA (9), etc. Sin embargo, a pesar de la disponibilidad actual de información y herramientas existen limitaciones en el modelado. Algunas de las temáticas en las cuales se sugiere avanzar en el conocimiento son : desarrollo de modelos no sobrecomplicados, modelación con apropiados niveles de detalle, efectos de escala, modelado a pequeña escala, integración de modelos y modelado continuo (13) (2). Dentro de este contexto, se presenta un sistema de simulación hidrológica-hidráulica apto para ambientes rurales y urbanos. La estructura de modelación ha resultado apta para la simulación con diferentes grados de detalle y en distintas escalas, desde simulación en pequeños conductos, micro y macro cuencas urbanas y cuencas rurales.

FORMULACION DEL SISTEMA

El sistema de modelación está basado en los esquemas de celdas originalmente propuestos por Cunge (6). En sucesivas investigaciones se ha ampliado el campo de aplicación original (14)-(20). Actualmente, el sistema permite la simulación de la transformación lluvia-caudal con dinámica multidireccional en ambientes rurales y urbanos. En cada unidad de la capa superficial es posible plantear los procesos de precipitación, lluvia, pérdidas por interceptión y almacenamiento superficial, e infiltración. El escurrimiento resultante puede ser propagado mediante un espectro de leyes de descarga desde la aproximación cinemática de la ecuación de momento hasta una aproximación a la ecuación dinámica, permitiendo el tránsito por ríos, canales, valles de inundación, calles urbanas y conductos cerrados. Para contemplar alternativas puntuales de flujo se incorporaron leyes de descarga para puentes , sumideros, vertederos, embocaduras, cambios de sección y estaciones de bombeo. El sistema fue denominado CTSS8 .No se realizaron versiones comerciales del mismo. 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.

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 (6):

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

donde $P_{i(t)}$ es lluvia, interceptión, almacenamiento superficial, infiltración e intercambio externo de caudales en la celda i , A_{S_i} y z_i área mojada superficial y nivel de agua en celda i ; $Q_{k,i}$ caudal intercambiado entre celdas k e i .

La *precipitación* se define en términos de lámina caída en cada celda y en función del tiempo. La *interceptión* en vegetación y *el almacenamiento superficial* son definidos como

alturas de agua promedio en cada celda. La *infiltración* puede ser calculada mediante las metodologías del CN o de Green y Ampt (4).

Leyes de descarga entre celdas

Unión Cinemática: Se utiliza cuando la información del mecanismo hidrodinámico se propaga solamente hacia adelante (17).

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

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

donde $R_{h_{k,i}}$, $A_{t_{k,i}}$ y $S_{0,k,i}$ son el radio hidráulico, área transversal y pendiente longitudinal de la vinculación entre celdas k e i y η rugosidad de Manning.

Unión tipo Río Simple: Se utiliza para escurrimientos con preponderancia de las fuerzas de gravedad, presión hidrostática y fricción. El caudal se deduce por discretización de la ecuación de momento para flujo con fuerzas inerciales despreciables y considerando la ecuación de Manning (6):

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

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 .

Unión Cuasi-Dinámica: Se emplea en vinculaciones donde los mecanismos convectivos son relevantes. Se parte de la ecuación de momento, despreciando el término local y con una discretización que permita despreciar la derivada $\partial Q/\partial x$ (13) y (14):

$$Q_{k,i}^{(n)} = \pm \frac{K_{k,i}}{\sqrt{\Delta x_{k,i}}} \sqrt{\text{ABS} \left[\frac{z_k^{(n)} - z_i^{(n)}}{1 + [K_{k,i}/\sqrt{\Delta x_{k,i}}]^2 / 2g (A_i^{-2} - A_k^{-2})} \right]} \quad (5)$$

donde A_i y A_k son las áreas mojadas transversales de las celdas k e i y g la aceleración de la gravedad.

Unión Dinámica: Se parte de la ecuación momento y se arriba a una expresión aproximativa de segundo grado en la variable caudal (18) :

$$a_1 Q_{k,i}^2 + a_2 |Q_{k,i}| Q_{k,i} + b Q_{k,i} + c = 0 \quad (6)$$

$$Q_{k,i}^{(n)} = -b + \frac{\sqrt{b^2 - 4(a_1 + a_2)c}}{2(a_1 + a_2)} \quad \text{si } c < 0 \quad (7.a)$$

$$Q_{k,i}^{(n)} = -b - \frac{\sqrt{b^2 - 4(a_1 - a_2)c}}{2(a_1 - a_2)} \quad \text{si } c > 0 \quad (7.b)$$

donde a_1 , a_2 , b , c son coeficientes función de $Q_{k,i}^{(n-1)}$, $z_i^{(n-1)}$, $z_k^{(n-1)}$

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 (6):

$$Q_{k,i}^{(n)} = \mu_1 b_l \sqrt{2g} (z_k^{(n)} - z_i^{(n)})^{3/2} \quad \text{Descarga libre} \quad (8.a)$$

$$Q_{k,i}^{(n)} = \mu_2 b \sqrt{2g} (z_k^{(n)} - z_w) \sqrt{z_k^{(n)} - z_i^{(n)}} \quad \text{Descarga sumergida} \quad (8.b)$$

donde z_w y b_l son la cota de fondo y longitud vertedero y μ_1 , μ_2 los coeficientes de gasto de vertedero libre y ahogado

Unión tipo Puente: Se utiliza la expresión de caudal para vertederos con escalón de fondo nulo y coeficiente de gasto según Ven Te Chow (5) para flujo a través de constricciones (13) y (14).

Unión tipo Sección de Control : Es para toda singularidad donde se manifieste una pérdida de energía del flujo debido a bruscos cambios en la sección de escurrimiento (17):

$$Q_{k,i}^{(n)} = \sqrt{2g} \sqrt{(z_k^{(n)} - z_{cri}) / (Cd^{-2} A_{cri}^{-2} - At_k^{-2})} \quad \text{Descarga libre} \quad (9.a)$$

$$Q_{k,i}^{(n)} = \sqrt{2g} \sqrt{(z_k^{(n)} - z_i^{(n)}) / (Cd_s^{-2} A_{sc}^{-2} - At_k^{-2})} \quad \text{Descarga sumergida} \quad (9.b)$$

donde z_{cri} , A_{cri} son el tirante crítico y área para tirante crítico en sección de control ; A_{sc} el área mojada en sección de control y Cd el coeficiente de gasto sección de control.

Unión en Conductos Cerrados : Las ecuaciones de continuidad y descarga para flujo a superficie libre son del mismo tipo que las planteadas en las aproximaciones de onda difusiva, cuasi-dinámica y dinámica (15) (16). Para flujo a presión el area superficial A_s en ec. (1) se calcula considerando la rendija de Preissmann (1) a lo largo del conducto.

Unión Tipo Sumidero: Representa las obras de captación de sistemas de drenaje urbano como sumideros con o sin reja, en cordón, en solera o combinado (17). La descarga se cuantifica mediante leyes de vertedero u orificio, con descarga libre o sumergida

$$Q_{k,i}^{(n)} = C_s \mu_l L_{su} (z_k^{(n)} - z_{su})^{1.5} \quad \text{Descarga libre} \quad (10a.)$$

$$Q_{k,i}^{(n)} = C_s \mu_a L_{su} (z_k^{(n)} - z_{su}) (z_k^{(n)} - z_i^{(n)})^{0.5} \quad \text{Descarga sumergida} \quad (10b.)$$

donde μ_l , μ_a son los coeficientes de gasto sumidero a descarga libre y ahogado; C_s el coeficiente de características geométricas e hidráulicas de sumidero y L_{su} , z_{su} la longitud de abertura y cota de fondo umbral de sumidero.

Unión tipo Bombeo: Permite incorporar elementos de elevación de flujo mediante adición de energía externa como bombas o estaciones de bombeo (17). Es necesario especificar la secuencia de bombeo en función del tiempo o en función de la cota aguas arriba

FORMULACION NUMERICA

Para la resolución es adecuado el uso de un esquema implícito (6) del tipo:

$$A_{s_i} \frac{\Delta z_i}{\Delta t} = P_i + \sum_{k=1}^j Q_{k,i}^{(n)} + \sum_{k=1}^j \frac{\partial Q_{k,i}^{(n)}}{\partial z_i} \Delta z_i + \sum_{k=1}^j \frac{\partial Q_{k,i}^{(n)}}{\partial z_k} \Delta z_k \quad (11)$$

las funciones A_S , P_i y $Q_{k,i}$ son conocidas en el tiempo t y los incrementos Δz_i y Δz_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 dinámicas deben definirse los caudales iniciales en tales vinculaciones.

APLICACIONES

Cuenca Urbana

El sistema fue implementado en una cuenca urbana de 65 Ha de la ciudad de Rosario (Argentina) (Fig 1) (20). La cuenca no tiene capacidad suficiente para evacuar lluvias de recurrencia $R > 1$ año, por lo que habitualmente se produce interacción de flujo entre el sistema mayor y menor de drenaje. La pendiente longitudinal media de las calles es de 1.8‰. La cobertura superficial es un 35% con superficie permeable y 65% impermeable. Los conductos subterráneos tienen diámetros variables desde 0.20 m hasta 0.60 m, con pendiente longitudinal media del 2.0‰, conectados al sistema superficial mediante 180 m de sumideros. La implementación del modelo CTSS8 se llevó a cabo con 625 celdas y 731 vinculaciones. (Figs. 1 y 2). El grado de detalle de la modelación resultó de 9.55 celdas/Ha, lográndose calcular alturas y caudales en cada una de los tramos de calles entre esquinas, en esquinas, y en tramos de conductos asociados. La calibración se llevó a cabo mediante la reproducción de tormentas con aforos de lluvias y caudales. Los parámetros calibrados fueron: resistencia en escurrimiento desde manzanas $\eta = 0.40$; escurrimiento por calles $\eta = 0.027$; escurrimiento por conductos $\eta = 0.020$ y coeficientes de descarga de sumideros 0.70. Los hidrogramas y limnigramas calculados se acercaron con una adecuada aproximación a los observados, tanto en el cuerpo general de las ondas, como en los tiempos característicos y valores máximos (Figs. 3 y 4). En una simulación con menor grado de detalle el modelo fue implementado con 15 celdas, resultando 0.27 celdas/Ha. Este grado de detalle permitió la reproducción aproximada de la variación de niveles y caudales en el conductos principal y en la sección de control de la cuenca. En lluvias netas con intensidades superiores a 2 mm/h se produjo la entrada en carga de gran parte de los conductos subterráneos, comportándose el modelo con robustez ante esta modalidad de flujo. El Δt de cálculo estuvo gobernado por las uniones entre elementos con volúmenes sumamente diferenciados, resultando $\Delta t = 1$ s. Para aportar información al redimensionamiento de la red se simuló el flujo para una tormenta con $R = 2$ años. La información generada permitió el trazado de un mapa de las alturas máximas en cada esquinas de la cuenca. El elevado grado de detalle resultó de importancia para la determinación de las evoluciones de alturas de agua sobre calzada en cada esquina.

Mapeo de Inundaciones en tramo de Río Ludueña

En esta aplicación se determinaron los mapas de riesgo de inundación sobre el Ao. Ludueña en la región de Rosario (16) (17). Este curso drena una cuenca de 800 km² fluyendo hacia el río Paraná. El valle de inundación en estudio pertenece a la cuenca baja y abarca una extensión superficial de 50 km² (Fig. 7). Un 75% del área es zona rural, un 15% es simiurbanizada y un 10% esta completamente urbanizada. La población de la zona es de 300.000 habitantes. La longitud del curso principal y sus tributarios es de 19 km, con una pendiente media de 1.2‰. Sobre el curso principal el desborde se produce para 80 m³/s. En un tramo de 1,5 km de longitud el río es entubado en 5 conductos cerrados. La sección transversal de los conductos es de 73.3 m², y la máxima capacidad

de descarga es de 350 m³/s. Los objetivos del estudio fueron analizar el comportamiento hidráulico y determinar los mapas con riesgo de inundación para un estado natural (sin obras) y en un estado de obras construidas (presa de retención de crecidas y ampliación de conductos cerrados). Los mapas fueron determinados para recurrencias de 50, 100 y 500 años y para la crecida máxima probable (PMP), a manera de evento catastrófico. La discretización topológica y espacial fue conformada con 202 celdas y 311 vinculaciones (Fig. 4). El grado de detalle fue de 4.04 elementos/km². El modelo fue calibrado en función de diferentes crecidas, principalmente con una de R: 50 años ocurrida en el año 1986. Los valores de caudales picos para las crecidas ensayadas fueron 500, 700 y 1000 m³/s para R: 50, 100 y 500 años y 1700 m³/s para la crecida máxima probable. Un análisis de incertidumbre de 1er. orden de la altura indicó que para la crecida de R: 500 años el máximo error relativo en alturas de agua en cursos principales fue del 11% y sobre valle de inundación 19%. Se presentan los resultados para R: 50 años en un estado sin obras y para R: 500 años con obras. En la Figs. 5 y 6 se presentan los hidrogramas entrantes desde la cuenca y los hidrogramas computados aguas abajo y en la Fig. 7 los mapas de inundación. El área inundada calculada para R: 50 años (estado sin obras) fue de 2185 Ha, y para R: 500 años 2005 Ha. Los resultados muestran el efecto positivo de las obras construidas. En base a los resultados, autoridades municipales han planificado las medidas estructurales necesarias para el uso y control de ocupación del valle de inundación, conjuntamente con la legislación asociada.

Cuenca del Río Ludueña

Esta aplicación consistió en la utilización del modelo CTSS8 como subsistema de escurrimiento superficial dentro de un sistema global de simulación hidrológica denominado SHALL (19) y (24). La cuenca modelada correspondió al Río Ludueña, ubicada al sureste de la provincia de Santa Fe (Fig. 8). Su red de cursos permanentes y transitorios mide 140 km., el área en estudio fue de 700 km² con una pendiente media de 1,0 ‰. El caudal base del río 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. 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 (carreteras y férreas) 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 discretización seleccionada se compone de 100 celdas y 111 vinculaciones, alcanzándose un grado de detalle promedio de 0,14 elementos/km² (Fig. 8). La condición de borde fue una relación H-Q en una gran puente carretero adoptado como sección de control. El mayor grado de detalle en los cursos fue altura media y caudales en tramos de 5 km. La definición de detalle considerada ha permitido la desagregación de múltiples parámetros geométricos e hidráulicos de los componentes del sistema. Durante cada simulación, el modelo CTSS8 fue cargado con las precipitaciones netas computadas mediante el subsistema de pérdidas del SHALL. El proceso de calibración se efectuó en base a diferentes eventos con registros de lluvias en 2 estaciones meteorológicas, hidrogramas y altogramas en 2 estaciones de aforos. El ajuste abarcó las situaciones sin y con desborde masivo. Los parámetros de calibración se correspondieron íntegramente con los valores estándares hallados en la bibliografía para la cuantificación de la resistencia al escurrimiento en cursos de agua, planicies de inundación, vertederos, puentes y alcantarillas. En la Fig. 9 se presentan las comparaciones de hidrogramas observados y computados para dos crecidas típicas sin y con desborde. El modelo CTSS8 como componentes del SHALL fue explotado para el análisis de diversas alternativas de escurrimiento.

CONCLUSIONES

El modelo presentado ha demostrado una adecuada capacidad de reproducción del proceso real de transformación lluvia-caudal con escurrimiento cuasi-bidimensional en capa individual y en dos capas interconectadas. La estructura de modelación ha resultado apta para la simulación con diferentes grados de detalle y en distintas escalas, permitiendo la desagregación máxima posible de los componentes físicos, parámetros geométricos e hidráulicos compatible con la información disponible. Los parámetros de calibración ajustados se correspondieron íntegramente con valores estándares hallados en la bibliografía para la cuantificación de la resistencia al escurrimiento.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- (1) Abbott, M. and Cunge, J. (1981) *A modelling system for the design and operation of storm-sewer network 11* Engineering applications of computational hydraulic storm, Vol. 1, Pitman, London
- (2) Cao, C., Yen, B.C. and Benedini, M.(editores) (1993) *Urban Storm Drainage Proceeding U.S.-Italy Bilateral Seminar*, Water Resources Publications, Highlands Ranch
- (3) Chocat, B., Seguin, D. and Thibault, S. (1984) *Storm Drainage System Design with Micro-Computer Aid The Cedre System*, 3rd Internat. Conf. on Urban Storm Drainage, Göteborg (ed. by P. Balmer et al.)
- (4) Chow, V.T., Maidment, D.R. and Wags, L.M. (1987) *Hidrología Aplicada*, Mac Graw-Hill, Bogotá
- (5) Chow, V.T. (1959) *Hidráulica de los Canales Abiertos*, Mac Graw-Hill, Edit. Diana, México
- (6) 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
- (7) Danish Hydraulics Institute (1995) *MIKE11 User Manual*, V 3.11, Horsholm
- (8) Danish Hydraulics Institute (1996) *MOUSE User Manual*, V 4.0, Horsholm
- (9) Gomez M. (1988) *Contribución al estudio del movimiento variable en lámina libre en las redes de alcantarillado*. Tesis Doctoral, ETSECCPB, UPC, Barcelona
- (10) Hoff-Claussen, N.E., Havno K. and Kej A. (1981) *System 11 Sewer - A Storm Sewer Model*,. 2nd International Conference on Urban Storm Drainage, Urbana, Illinois (ed. B. C. Yen)
- (11) Huber, W.C. and Dickinson, R.E. (1988) *Storm Qwater Management Model User's Manual*, V4, EPA, Environmental Protection Agency, Athens, Georgia
- (12) Hydrologic Engineering Center, U.S. Army Corps of Engineers (1981) *HEC-1 Flood Hydrographs Package, User's Manual*, Davis, California
- (13) O'Loughlin, G., Huber, W. and Chocat, B (1996) *Rainfall-runoff processes and modelling*, JHR, V 34, N° 6, pp. 733-752.
- (14) Riccardi, G. (1994) *Un Modelo Matemático Hidrodinámico cuasi-bidimensional para escurrimiento cuasi-dinámicos*, XVI Congreso Latinoamericano de Hidráulica, IAHR-LAD, Santiago
- (15) Riccardi, G. (1995) *Math. Modelling of flood for the delimitation of zones with inundation risk*, International Symposium on Runoff Computations for Water Projects, IAHS, San Petesburgo
- (16) Riccardi, G. (1997) *The mathematical modelling for the delimitation of inundation risk zones*, Sustainability of Water Resources under Increasing Uncertainty (ed. D. Rosberg et al.) IAHS Publication Nro 240, ISSN 0144-7815., Wallingford, pp.127-136.
- (17) Riccardi, G. (1997) *El Mapeo de Riesgo de Inundación por medio de la Modelación Matemática Hidrodinámica*, Revista Ingeniería del Agua, Vol 4 N° 3, ISSN 1134-2196, UPV, Valencia, pp.45-56.
- (18) Riccardi, G. (1997), *The flood propagation modelling for the management of flood plains of Rosario Region, Argentina*, River Flood Hydraulics, (J. Watts, ed.), HR Wallingford Ltd, UK, pp. 127-136.
- (19) Riccardi, G. (1998) *Testeos y Aplicaciones del Modelo Matemático de Simulación Hidrológica-Hidráulica CELDAS8*. Inédito, Informe Anual, Consejo de Investigaciones, UNR, Rosario
- (20) Riccardi, G. (1999) *Un Sistema de Simulación Hidrológica-Hidráulica cuasi-2D multicapa para ambientes rurales y urbanos*, Inédito, Informe de Tesis Doctoral, FCEFyN, UNC, Córdoba
- (21) Sjöberg, A. (1981) *Sewer Network Models DAVGL-A and DAVGL-DIFF*. 2nd International Conference on Urban Storm Drainage, Urbana, Illinois (ed. B. C. Yen)
- (22) Terstriep, M.L. and Stall, J.B. (1974) *The Illinois Urban Drainage Area Simulator ILLUDAS*, B 58, Illinois State Water Survey, Urbana
- (23) U.S. Soil Conservation Service (1975) *Urban Hydrology for Small Watersheds, Technical Release No. 55*, SCS-USDA, Washington, D.C.
- (24) Wisner, P.E. (1983) *IPSWM Urban Drainage Modelling Procedures, The Implementation of Storm Water Management Program*, University of Ottawa
- (25) Zimmermann, E. and Riccardi, G. (1995) *Modelling of Fluxes of Water in Flatland*, XX General Assembly European Geophysical Society, Hamburgo

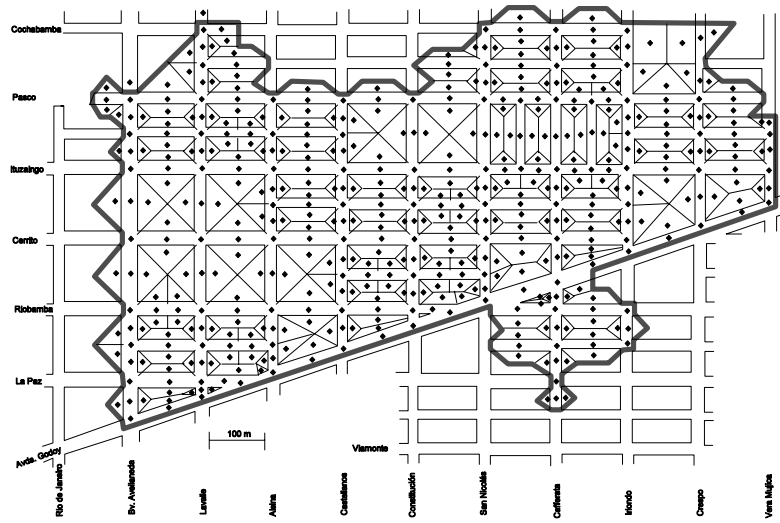


Figura 1. Planimetría de la cuenca y discretización espacial de capa superficial

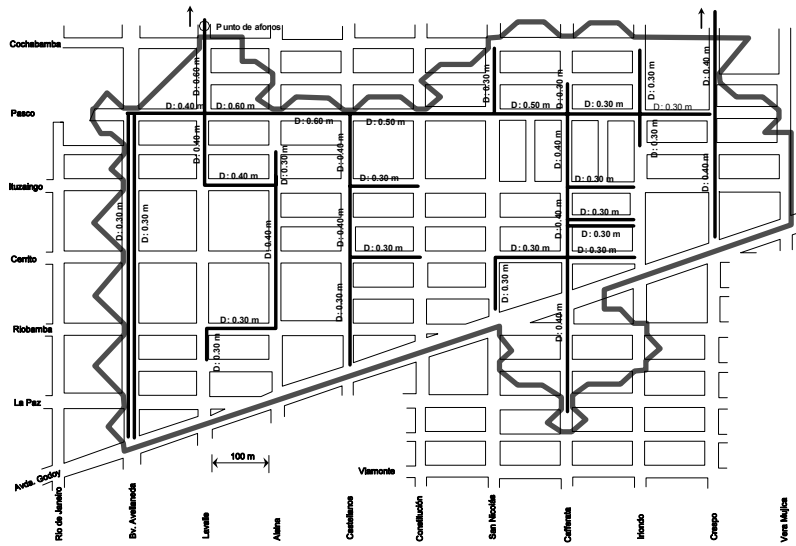


Figura 2. Red de conductos subterráneos

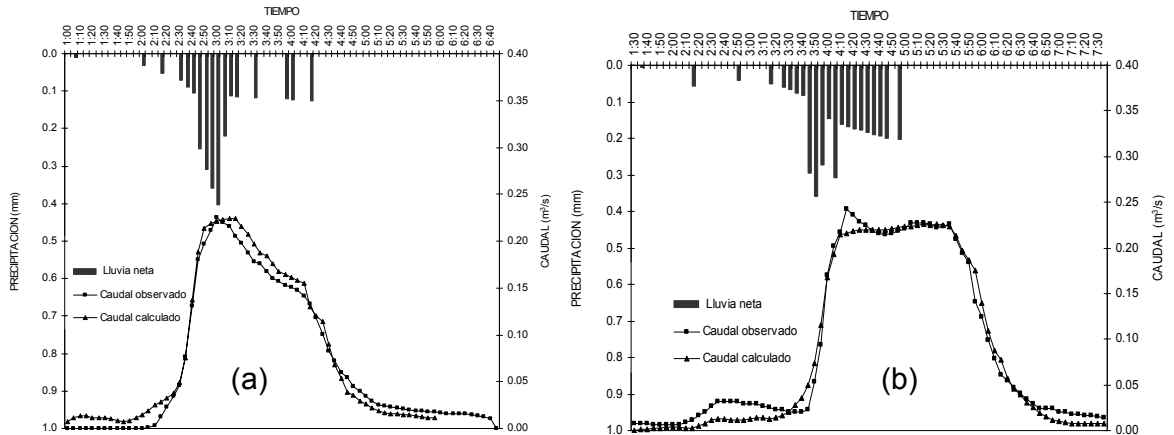


Figura 3. Crecidas de calibración. (a) $P=10\text{ mm}$ $P_n=2.6\text{ mm}$; (b) $P=14.5\text{ mm}$ $P_n=3.5\text{ mm}$

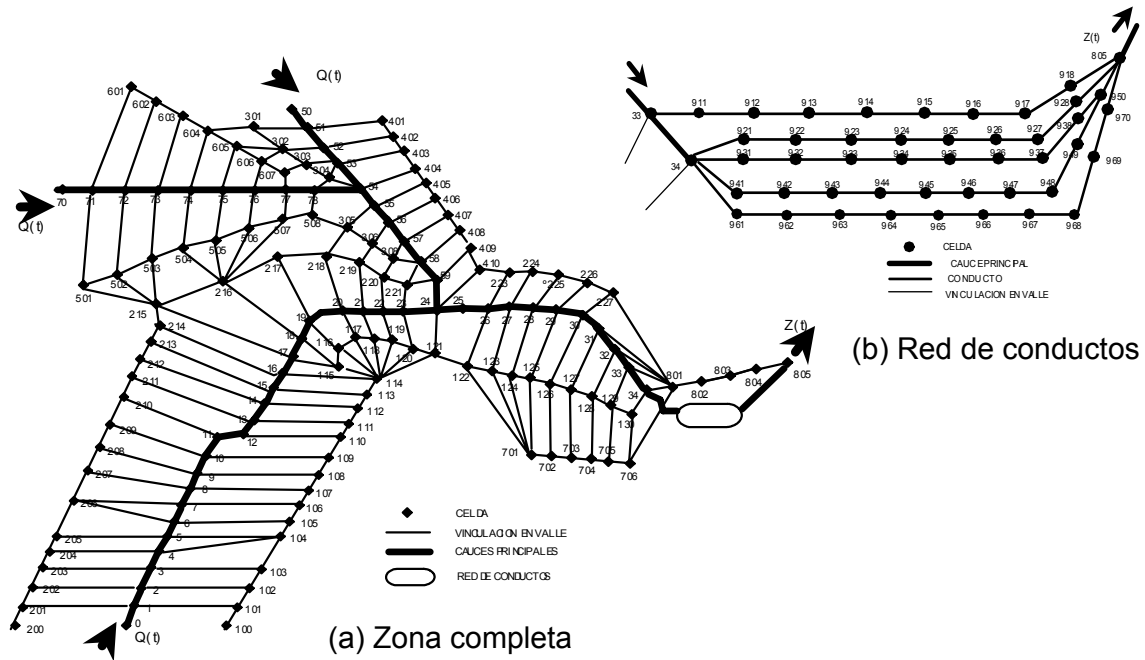


Figura 4. Topología de zona de mapeo de riesgo de inundaciones en Ao. Ludueña

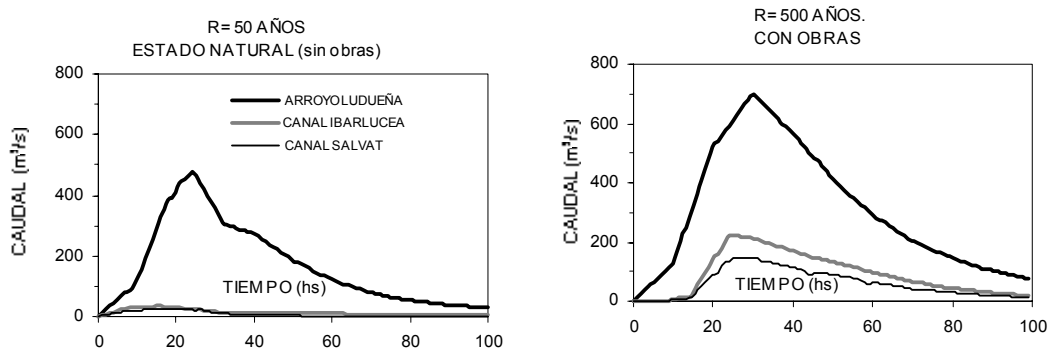


Figura 5. Hidrogramas entrantes al tramo. Recurrencia 50 y 500 años

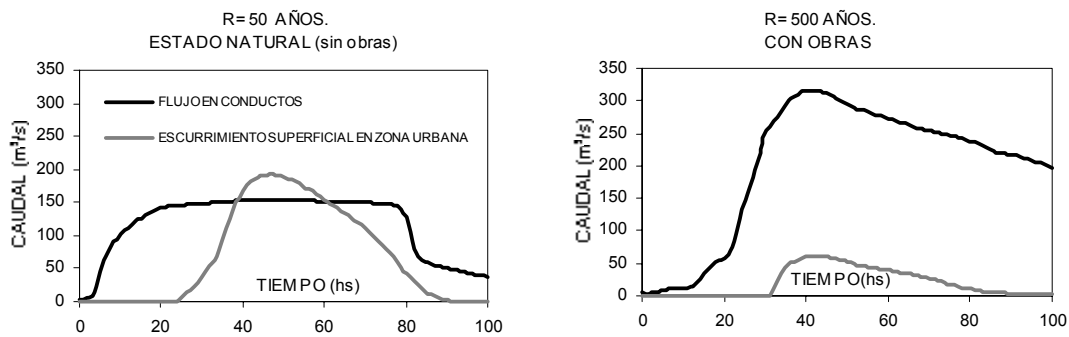


Figura 6. Hidrogramas en zona aguas abajo. Recurrencia 50 y 500 años

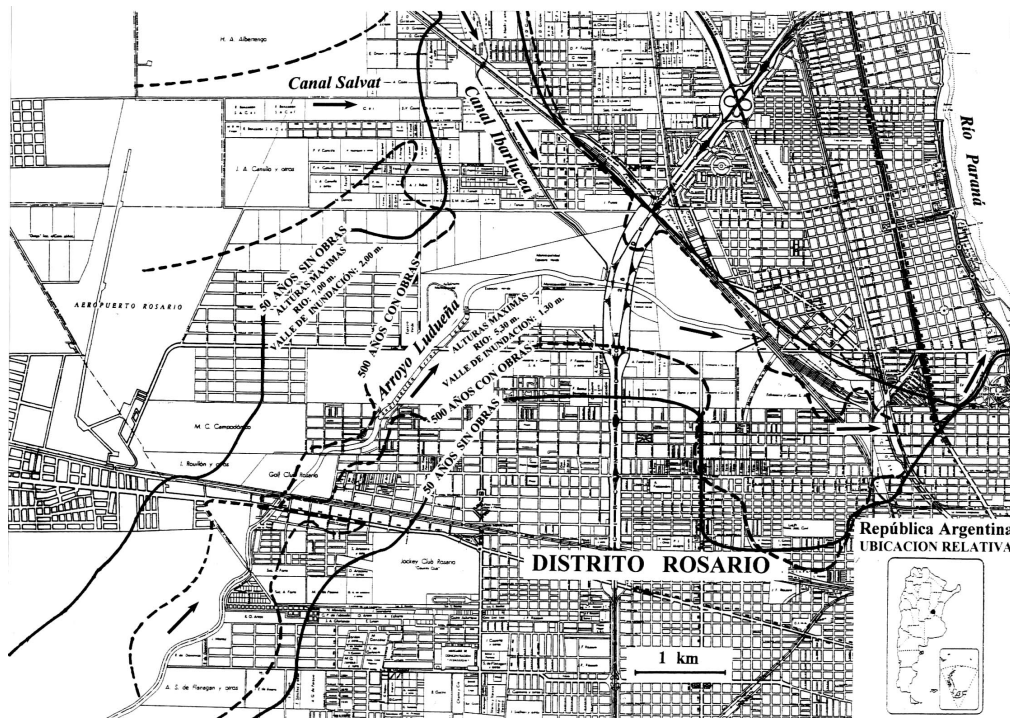


Figura 7. Mapas de riesgo de inundación en Arroyo Ludueña. R: 50 y 500 años

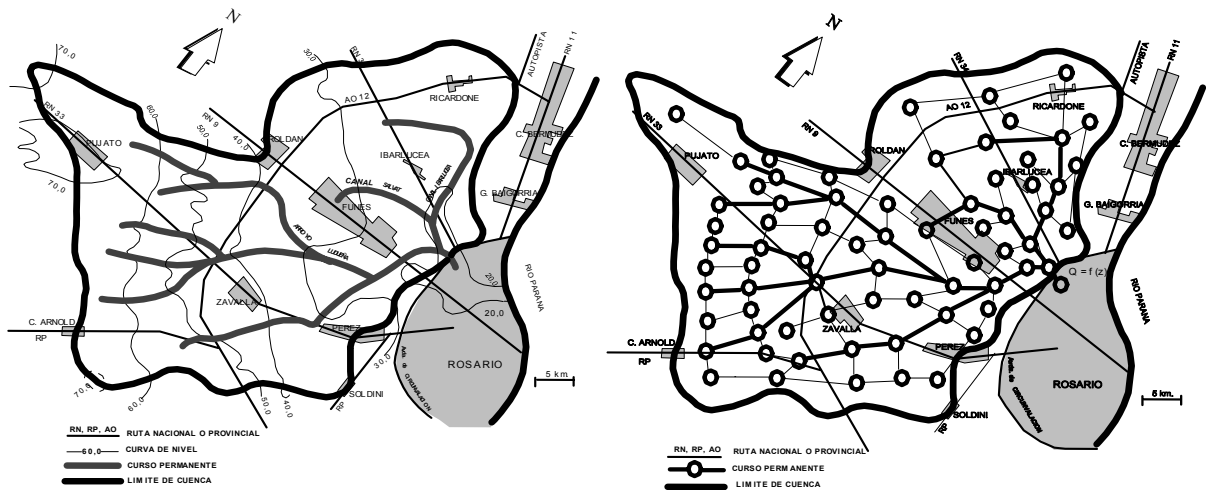


Figura 8. Cuenca Ao. Ludueña. Planialtimetría y topología zona modelada

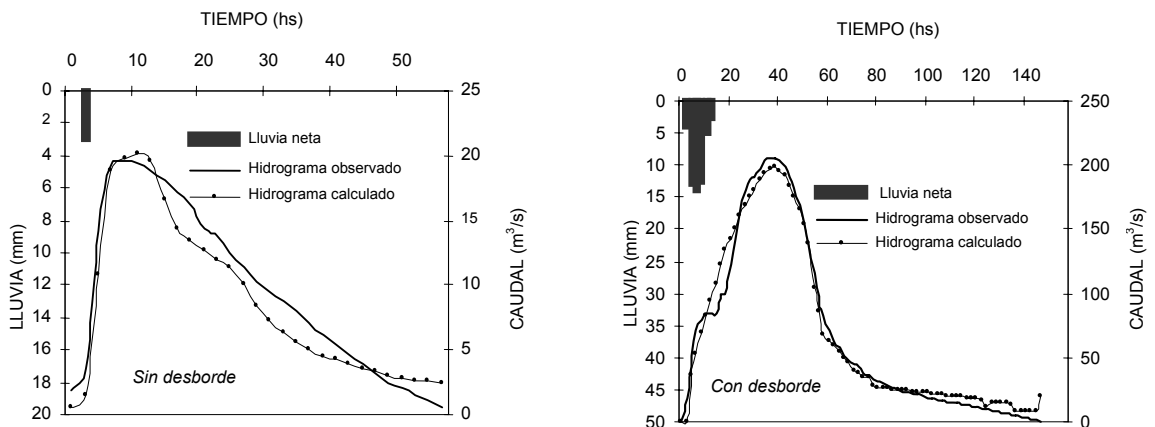


Figura 9. Hidrogramas observado y calculado. Eventos sin y con desborde.