

LA TRANSFORMACION LLUVIA-CAUDAL EN AMBIENTES RURALES Y URBANOS. LOS PROCESOS HIDROLOGICOS Y EL MODELADO

por

Gerardo Adrián Riccardi

Investigador CIUNR. CURIHAM. FCEIA. UNR

Riobamba 245 bis. 2000 Rosario (SF). Argentina

TeleFax: 54 (0)41 25 6294 e_mail: riccardi@fceia.unr.edu.ar

RESUMEN: Se presenta en este informe la síntesis de una recopilación y revisión bibliográfica respecto al estado actual del conocimiento en la problemática del modelado de los procesos hidrológicos e hidráulicos intervinientes en la transformación lluvia-caudal en ambientes urbanos. En primer lugar se describen los procesos y las alternativas básicas de modelado. Posteriormente se presenta un panorama de los métodos y modelos existentes, comenzando con una breve descripción de la evolución histórica. Finalmente se exponen las limitaciones más significativas en el estado actual del conocimiento, concluyéndose con las necesidades y orientación de las actuales líneas de investigación, planteadas por los más importantes estudiosos de la temática a nivel mundial.

INTRODUCCION

En la actualidad, los dos principales objetivos en la fase de indentificación de problemas en la gestión de los drenajes pluviales tanto en ambientes rurales como urbanos son: la mitigación de crecidas y la disminución de la contaminación del escurrimiento. Ambos objetivos requieren con mayor o menor grado de detalle estimaciones de parámetros de flujo tales como alturas de agua, velocidades y caudales de escurrimiento. El camino obvio para la estimación sería por supuesto la observación directa y medición de los parámetros del flujo, sin embargo existe una imposibilidad física de obtener mediciones en todos los eventos de lluvia ocurridos. Por lo tanto se recurre al camino indirecto de estimación de parámetros de flujo mediante el modelado matemático. Los modelos lluvia-caudal pueden ser considerados como la principal herramienta de todo estudio de gestión de drenaje.

TRANSFORMACIÓN LLUVIA-CAUDAL

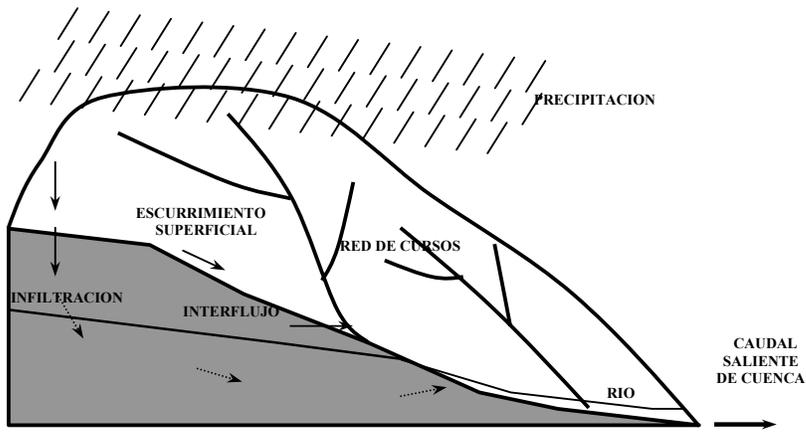
Los procesos hidrológicos involucrados en la transformación lluvia-caudal han sido ampliamente estudiados por científicos para desarrollo del conocimiento y por ingenieros para diseño hidráulico de los sistemas de drenaje. En la Fig. 1.a se presentan los principales procesos hidrológicos producidos en una cuenca rural típica. Los procesos reales son ciertamente complejos involucrando gran cantidad de mecanismos y en general se los simula mediante modelos que contemplan distintos grados de aproximación a la dinámica física del mecanismo.

Una primera aproximación corresponde a los *modelos de caja negra* (Fig. 1.b) los cuales operan basados en la conversión de un estímulo o señal de entrada (lluvia) a una señal de salida (caudal), mediante un determinado algoritmo de transformación, sin una explicación de los mecanismos físicos reales de los procesos. Con estas características podemos mencionar el caso relativamente simple de un modelo intuitivo como el *método racional* o sumamente complejo como modelos de *simulación estocástica*, basados en análisis estadísticos de series de tiempo. La segunda aproximación corresponde a los modelos de dos componentes (Fig. 1.c). El primer componente evalúa la abstracción de las *pérdidas* producidas, en el que se cuantifica la porción de lluvia total caída que se vio afectada por los procesos de interceptación, almacenamiento superficial, evaporación e infiltración. El remanente de lluvia corresponde al escurrimiento superficial y su movimiento se evalúa mediante un *modelo de tránsito*, el cual cuantifica el retardo y atenuación de la onda de crecida conformada por los múltiples aportes de la cuenca. En general estos modelos se basan en analogías con los procesos reales, pero no son físicamente realistas a nivel de detalle de los procesos. Generalmente las simulaciones son por eventos, generando resultados en los intervalos de tiempo en que se divide el tiempo total del evento. La información antecedente (humedad de suelo, estado de almacenamiento superficial) debe ser suministrada como dato.

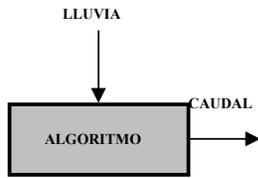
El tercer nivel de aproximación corresponde a los modelos matemáticos basados en el *modelo de procesos físicos* (Fig. 1.d). En este tipo de modelos se identifican y evalúan matemáticamente gran parte de los procesos presentes en el ciclo hidrológico. Existe una amplia variedad de este tipo de modelos, difiriendo en el grado de contemplación y despreciación de los procesos físicos. Estos modelos pueden ser operados por eventos o en largos períodos de tiempo (meses, años), con intervalos temporales a diferente escala. La información antecedente de cada evento puede ser generada dentro del proceso de simulación temporalmente continua.

En todos los casos, los modelos deben ser calibrados en función de información disponible al menos de lluvia caída en la cuenca y caudal saliente.

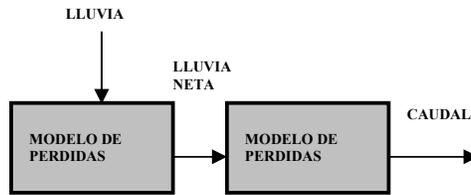
La consideración de la distribución areal de las variables hidrológicas contempladas en la modelación se realiza mediante la subdivisión de la cuenca en subcuencas vinculadas.



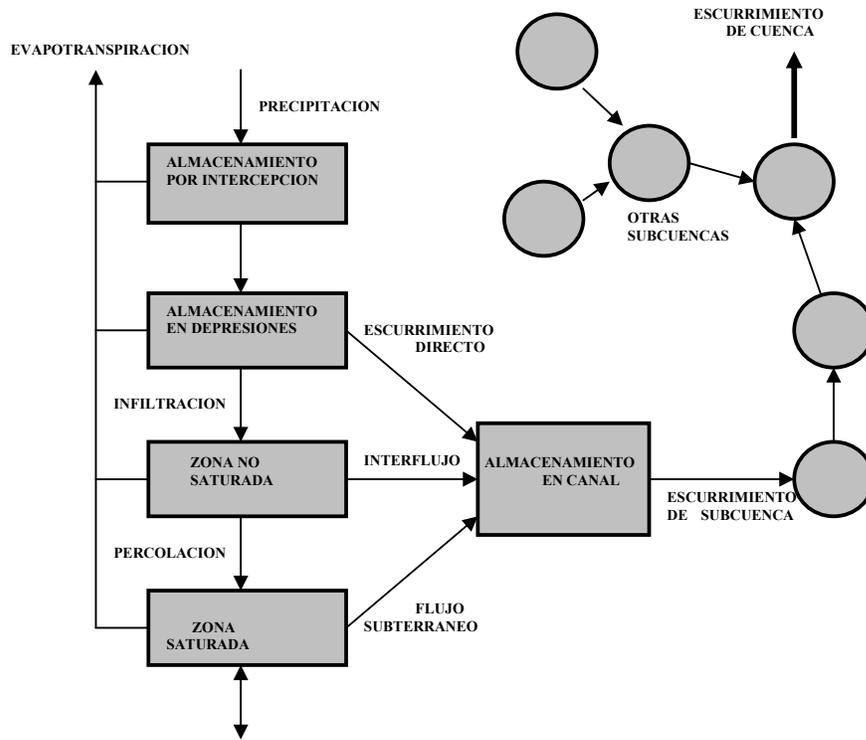
a) Perfil Longitudinal de una Cuenca Rural. Principales Procesos Hidrológicos



(b) Modelo Simple
Tipo Caja Negra



(c) Modelo de dos fases
Pérdidas-Tránsito



(d) Modelo de Procesos Físicos

Figura 1. Modelos y Procesos Hidrológicos del Ciclo Lluvia-Caudal

CUENCAS URBANAS

Toda cuenca urbana ha sido en algún momento de la historia una cuenca rural, con lo cual puede considerarse a las cuencas urbanas como el efecto de una continua perturbación debido al impacto sobre el medio ambiente natural provocado por los procesos dinámicos de urbanización llevados a cabo por el hombre.

Las modificaciones fundamentalmente se manifestaron y manifiestan en cambios en la superficie de la cuenca y las vías de escurrimiento natural del flujo.(Fig. 2.a). La

impermeabilización de parte de la superficie de la cuenca implica reducción en áreas de infiltración con lo que aumenta el escurrimiento superficial y se reduce la infiltración, percolación, el escurrimiento sub-superficial y subterráneo. Todas las acciones de suavizamiento de la superficie como pavimentaciones, nivelaciones, etc. (implicando una disminución importante de la resistencia al flujo) y las redes artificiales de drenaje aceleran el flujo, pudiendo en casos existir la alternativa de retardo y amortiguamiento debido a terraplenes de defensa, rutas, embalses de retención.

De acuerdo a estudios el clima de una cuenca se altera en la medida en que se urbaniza. Se han observado incrementos de precipitaciones del orden del 5 al 15% debido a aumento de temperatura de los ambientes urbanos (0.5°-3°C) y a cambios de los vientos dominantes y otros factores climatológicos.

Las redes de desagües rurales se convierten en redes de conductos subterráneos, canales artificiales, pudiendo quedar también ciertos cursos naturales. Las condiciones de borde de la cuenca y las subcuencas incluidas pueden ser alteradas en forma importante.

El escurrimiento en regiones urbanas por lo general se conforma por dos componentes que si bien están interconectados, su funcionamiento es bien diferenciado. Uno de los componentes es el escurrimiento superficial que ocurre en techos, veredas, parques, calzadas, zanjas, cunetas, áreas impermeables, etc. , que puede fluir hacia las obras de captación del sistema de conductos, hacia sistemas de drenajes abiertos (canales urbanos) o fluir directamente hacia el cuerpo receptor. El segundo componente es el que transporta el agua captada del sistema superficial por medio de obras de captación (sumideros, captaciones de zanjas, etc.) denominado sistema de conductos de drenaje. Este sistema drena en general hacia el cuerpo receptor, pudiendo presentarse casos de afluencia a sistemas de drenajes abiertos. Los sistemas de conductos en general se han diseñado con una capacidad de conducción que permita el drenaje del escurrimiento directo de lluvias (en algunos casos crecidas) de 2 a 10 años de período medio de retorno, sin producir anegamiento en el sistema superficial. Para los eventos de recurrencias superiores a la de diseño, la red artificial drenará una parte y será superada, en tanto que la mayor parte del escurrimiento drenará por el sistema superficial (calles y sistemas de drenajes abiertos) . Este excedente causará inundaciones y la tendencia del movimiento del flujo será la de escurrir por las antiguas vías naturales, si la topografía no fue sustancialmente modificada. . El funcionamiento hidrodinámico del sistema se complejiza puesto que se producen trasbases de cuencas superficiales e interacción continua entre los sistemas mayores y menores, éstos últimos trabajando a presión.

Al sistema de conductos se lo denomina *sistema menor* y al superficial que transporta los excedentes *sistema mayor de desagües pluviales*

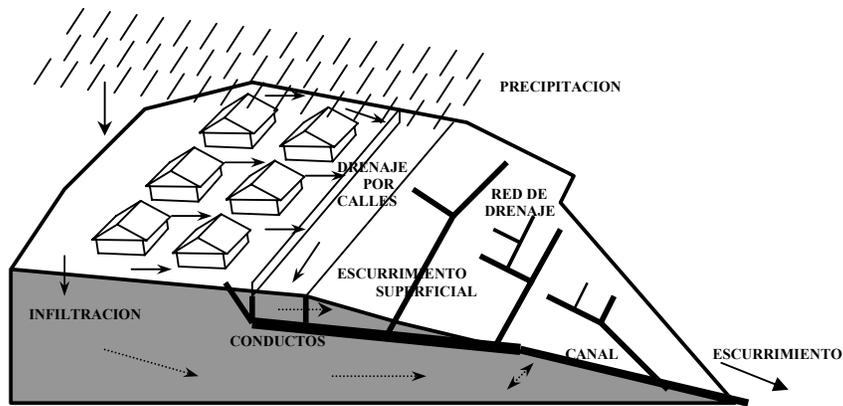
La concentración del flujo crece en la medida que la urbanización se desarrolla. Asimismo la velocidad de escurrimiento también aumenta, produciendo un descenso del intervalo de tiempo *lag*, factor de mayor importancia causante del incremento del caudal máximo. Esta

aligeración limita la atenuación de flujo y lleva a las cuencas a ser más sensibles a tormentas intensas de corta duración.

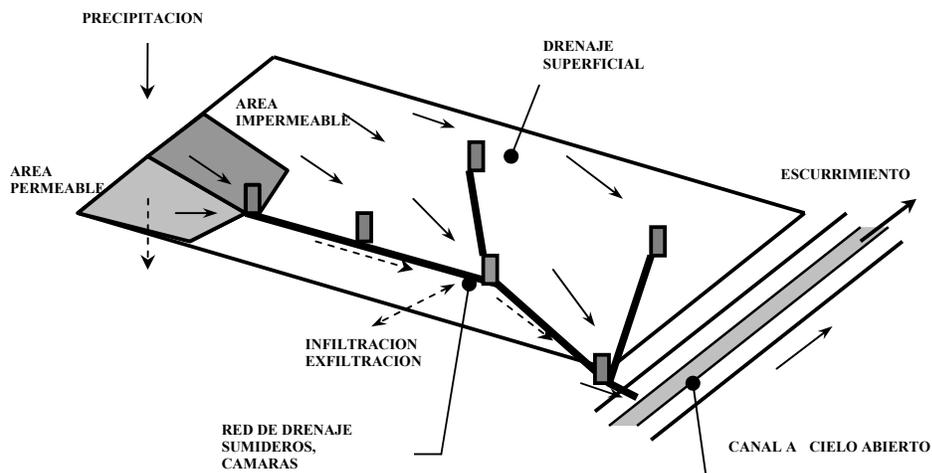
El balance de agua a nivel de cuenca también sufre alteraciones con los procesos de urbanización. Gran parte del agua que conforma la provisión de agua potable a los habitantes es transferida a los sistemas de drenaje. Actividades tales como regados de parques, jardines, etc. lagos artificiales, pueden alterar las condiciones de humedad del suelo, y por otro lado en grandes sectores impermeabilizados se suprime la infiltración natural y la recarga de los acuíferos, estos mecanismos alterados provocan cambios en los niveles de los acuíferos. Se ha observado en el caso de cursos de agua que atraviesan zonas urbanas un aumento del caudal base a partir de procesos de urbanización, a pesar de la baja de infiltración por impermeabilización de la superficie. Este aumento de flujo base conjuntamente con el incremento de la carga de sedimentos del escurrimiento, originado en las construcciones de obras, provocan cambios geomorfológicos en los cursos de agua. Aguas abajo de áreas urbanizadas en corrientes naturales pueden sucederse socavación de márgenes, erosiones generalizadas y procesos de sedimentación. La calidad del escurrimiento especialmente en los cuerpos receptores también sufrirá desmejoras, debido al incremento de nutrientes, contaminación fecal y la introducción de contaminantes como metales pesados, hidrocarburos, herbicidas y pesticidas.

La dimensión del impacto sobre el ciclo hidrológico causado por los procesos de urbanización y desarrollo depende de un importante número de factores físicos y culturales. El clima, la topografía, la geología, los tipos de suelos y vegetación tienen una importante influencia del mismo modo que la historia, los patrones y densidades establecidos para el desarrollo y la tipología de la red de drenaje pluvial. Se verifican notables diferencias entre adoptar un sistema unificado (pluviocloacal) o uno separativo como así también cuando se utilizan distintos criterios de definición de la capacidad de los conductos. Detalles como la modalidad de drenar el agua de escurrimiento de los techos manifiesta importantes efectos sobre la respuesta de la cuenca.

En cuencas no-urbanas se manifiestan cambios en la respuesta del sistema ante lluvias similares según eventos u acciones antrópicas como por ejemplo la quema de campos, rotación de los ciclos de cultivo, trazado de líneas férreas o viales, pero en cuencas urbanas el cambio continuo es predominante. Los procesos de reurbanizaciones son muy frecuentes, de modo tal que muchas áreas urbanas experimentan variaciones significativas en el uso de la tierra dentro del período de vida útil de las obras de drenaje y de los períodos temporales necesarios para establecer las relaciones estadísticas de diseño. Por lo tanto en el diseño de sistemas drenaje urbano, las características de la cuenca no pueden ser definidas como permanentes, lo que dificulta la fijación y agrupación de objetivos en términos precisos.



(a) Alteración del sistema de drenaje natural en Cuencas Urbanas



(b) Sistema básico de Desagües Pluviales separativo

Figura 2. Procesos Hidrológicos en Ciclo Lluvia-Caudal en Cuencas Urbanas

En lo concerniente a la cuantificación de las más importantes alteraciones producidas sobre los procesos hidrológicos se ha corroborado en distintas cuencas experimentales que el incremento del caudal pico puede superar las 50 veces y el volumen de escorrentía las 33 veces. El cambio es mayor para tormentas de baja intensidad. Esto se explica que en las

cuencas rurales en lluvias de baja intensidad gran parte del agua precipitada se pierde en las pérdidas iniciales y la infiltración y el escurrimiento solo ocurre cuando estas demandas son excedidas por la lluvia, en tanto que en cuencas urbanas con gran área impermeabilizada existe escurrimiento en todas las lluvias, con lo que el incremento relativo en caudal es elevado. En tormentas de larga duración, en las que toda la superficie permeable de la cuenca llega a un estado de humedad elevada el caudal es bastante similar entre el producido en superficies permeables y el correspondiente a superficie impermeables. Dado que las pérdidas (intercepción, almacenamiento superficial, infiltración) decrecen a medida que la superficie de la cuenca se impermeabiliza, y que un gran margen de incertidumbre tiene que ver precisamente con la evaluación de esas pérdidas es esperable en superficies impermeables una respuesta más predecible que desde superficies permeables, por lo que también en los modelos, en teoría, se incrementaría la confiabilidad de los resultados a medida que crece el porcentaje de superficie impermeable.

METODOS Y MODELOS

Requerimientos de Diseño

Todos los procesos hidrológicos citados han sido estudiados por científicos, principalmente para obtener información sobre caudales y volúmenes para programas de gestión de crecidas y contaminación. Gran parte de los desarrollos en recolección de datos y modelado han estado asociados a necesidades ingenieriles. En general en cuencas rurales son requeridos los hidrogramas solamente en la cuenca baja para el diseño de la obra en cuestión: alcantarilla, puente, vertedero, etc. . En cambio en cuencas urbanas deben ser determinados los hidrogramas y altogramas en las correspondientes sectorizaciones de la cuenca que involucre el diseño de cada componente del sistema de drenaje: cordon cuneta, sumideros, conductos, embalses, tramos de canal, etc.

Las tareas del ingeniero proyectista en general comprenden : (a) el uso de modelo para determinar caudales de diseño, localización y dimensiones de los componentes del sistema y (b) el uso de modelos de mayor rigurosidad para analizar el comportamiento del sistema una vez fijadas las características de los componentes del sistema. Los métodos y modelos hidrológicos e hidráulicos utilizados para diseño son más simples que para el análisis del sistema. Las lluvias consideradas en diseño pueden ser históricas (reales) o determinadas según métodos basados en estadísticas. En la Figura 4, puede verse un diagrama de las tareas en etapas de diseño y análisis.

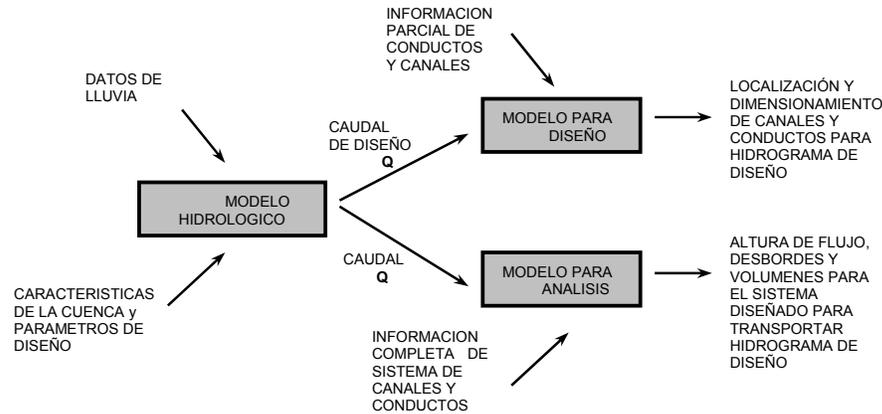


Figura 4. Etapas de Diseño y Análisis

Evolución histórica de Metodologías de Diseño

Hasta el siglo XVIII los drenes y canales eran calculados en base a prueba y error puesto que no existía información suficiente para desarrollar métodos que permitieran adoptar criterios y parámetros de diseño. Se evidenciaron notables avances a partir del desarrollo de la formulación de fricción en canales establecida por Chezy en Francia en 1770 y la recolección de datos meteorológicos en Europa a principios del siglo XIX. En los años 1840, en Irlanda Mulvaney inventaba un dispositivo para medir intensidades de precipitaciones y presentaba a la comunidad hidráulica el todavía vigente *Método Racional*. Para ese estado del conocimiento, determinado un caudal de diseño era posible dimensionar canales o conductos mediante las ecuaciones hidráulicas de resistencia.

Para el diseño de alcantarillado en el siglo XIX se desarrollaron varias fórmulas para la cuantificación del caudal de diseño entrante. Todas ellas relacionaban caudal con área de cuenca y eran de una fórmula general

$$Q = c \cdot A^b \tag{1}$$

donde Q (m^3/s) es el caudal, A (m^2) es el área de la cuenca, c es un factor dependiente del uso de la tierra, estado de impermeabilización, pendiente y otras características de la cuenca, b una constante que varía entre 0,50 y 1,00.

El método racional fue utilizado por primera vez en 1889 en Gran Bretaña, y fue adoptado gradualmente hasta que en 1940 era el método de cálculo estándar para el diseño de sistema de drenaje por calles. Dado que el método racional necesita datos de intensidades era utilizable en los lugares donde se contaba con tal información. La formulación era del tipo :

$$Q = \frac{C I A}{360} \quad (2)$$

donde: donde Q (m^3/s) es el caudal calculado, C es un coeficiente adimensional de escurrimiento, I (mm/h) es la intensidad de la lluvia correspondiente a una determinada duración y período medio de retorno, y A (ha) es el área de la cuenca.

Conjuntamente con el método racional fue el desarrollo de un método para establecer la lluvia de diseño. Una vez que se empezó a medir intensidad, con gran cantidad de datos, surge la relación entre la intensidad de la lluvia y su duración. En Estados Unidos se desarrolla la relación Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF), que suministra la información probabilística de lluvia necesaria para el método racional, estableciéndose además bases técnicas para el diseño, usando el período medio de retorno como la medida de frecuencia de falla.

Las investigaciones sobre la teoría del proceso lluvia-caudal llevadas a cabo desde 1930 a 1960 dieron un fuerte soporte para el desarrollo de la hidrología urbana. Siguiendo la cronología de los desarrollos podemos mencionar los estudios del método del Hidrograma Unitario de Sherman en 1932, hidrogramas sintéticos (Snyder, Mocus), la teoría de infiltración Horton en 1933, el procedimiento área-tiempo y los modelos de ruteo como por ejemplo el de Clark en 1945. Posteriormente Nash y Dooge en 1958 y 1959 desarrollaron los modelos de embalses en cascada. El Modelo de Cuenca de Stanford desarrollado por Crawford y Linsley y publicado en 1966 fue el primer modelo de simulación por computadora ampliamente usado. Muchos modelos posteriores estuvieron influenciado por el anterior. En la década del sesenta se desarrollaron otros modelos de embalses en cascada y entrelazados, gran labor cumplió en esas instancias el Profesor Ven Te Chow de la Universidad de Illinois.

En lo que respecta a métodos y modelos para diseño y análisis a partir de los años 60 comienza un incesante auge de desarrollos. En 1963 surge el TRRL en Gran Bretaña, el que fuera ampliamente utilizado. En los 70 siguen los avances adquiriendo relevancia el uso de la teoría de onda cinemática para flujos en superficies llanas. En 1972 se publican estudios de efectos de urbanización sobre cuencas. Posteriormente se desarrollan modelos que incluían la simulación de embalses de detención. Se desarrollan modelos como el ILLUDAS (Universidad de Illinois) el HEC-1 (Centro de Ingeniería Hidrológica), el TR55 (Servicio de Conservación de Suelos), STORM (Cuerpo de Ingenieros EEUU);. Además

surge un poderoso modelo como el SWMM (EPA Agencia norteamericana de protección del Medio Ambiente) que incorpora el transporte de contaminantes. En Canada se desarrollan versiones modificadas de los modelos SWMM y HYMO que se denominarían OTTSWMM y OTTHYMO, estos últimos modelaban efectos de urbanización y sistemas de detención y almacenamiento.

En Europa fueron desarrollados modelos principalmente para sistema combinados (pluvio cloacales) poniéndose mayor énfasis en la hidráulica que en la hidrología. Surgen modelos como el WASSP del Consejo Nacional del agua de Gran Bretaña, el WALLRUSS y SPIDA en la Universidad de Wallingford, el CAREDAS (Sogreah, Francia), el DAGVL (Suecia), el muy conocido MOUSE en el Instituto de Hidráulica Dinamarques DHI, el MARA (Barcelona, España), etc.

En Brasil en 1993 se publica un modelo de simulación en redes denominado NOPRES (Univ. Fed. de Porto Alegre, Brasil).

En Argentina se han desarrollados modelos como OCINE-2 (UNL, Santa Fe, Argentina, 1986); ARHYMO (CRA. INCYTH. Argentina, 1994); los que son versiones modificadas del modelo OCINE en el caso del primero y del HYMO10 y OTTHYMO el segundo.

En Rosario el autor del presente informe ha desarrollado el modelo CELDURB, que a la fecha permite la simulación de flujo superficial por valles rurales, ríos y calles urbanas; flujo en conductos cerrados subterráneo e interacción permanente y en ambos sentidos de flujo entre sistema mayor y menor.

Si bien el desarrollo de modelos ha sido muy importante el procedimiento más ampliamente usado en el mundo es el viejo Método Racional a pesar de las críticas a que se lo somete. En Estados Unidos el TR-55 y el Método Racional son más usados que el SWMM y el ILLUDAS. Muchos ingenieros proyectistas que no son debidamente asesorados por especialistas hidrólogos e hidráulicos valoran los modelos por su simplicidad, por la garantía de aprobación de las autoridades y por la fácil vinculación con los datos disponibles.

En la década de los 80 la necesidad de contar con bases de datos hidrológicas y de tópicos relacionados con el desarrollo y calibración de modelos ha llevado a la creación por ejemplo dos grandes bases, una en U.S. Geological Survey en Estados Unidos y en la Universidad de Belgrado en Europa.

Analizando la evolución histórica de las investigaciones y desarrollos puede decirse que el progreso en la hidrología urbana y en el diseño de obras de drenaje no ha sido uniforme en el tiempo ni en países o regiones. En general el ritmo lo ha marcado la demanda de los ingenieros proyectistas ante la insatisfacción con los métodos y modelos de uso corriente

en cada época. Los modelos hidrológicos fueron usados primeramente para estimar flujo de crecidas, más tarde surge la necesidad del modelado de efectos volumétricos para los embalses de retención, tasas de infiltración y flujos bajos y medios para estudios hidroambientales. Esta necesidad amplió el campo de la modelación llegando a las simulación continua de flujo, del transporte de sedimentos y contaminantes y flujo subterráneo. En la actualidad nuevos desarrollos se adicionan a los modelos permitiendo mayores campos de aplicación.

Asimismo existe un cambio en la filosofía de diseño tal como el concepto de sistemas mayor y menor. Esta idea surge en Estados Unidos a fines de los 70, y especifica dos tipos de metodologías para el diseño de un nuevo sistema. El sistema menor se dimensiona para eventos de período medio de retorno entre 2 a 10 años, y en segundo lugar se verifica el comportamiento del sistema mayor para crecidas extraordinaria como por ejemplo de 100 años de PMR. Un adecuado diseño de sistema de desagües pluviales bajo las premisas de los sistemas mayor y menor otorga un mayor conocimiento del comportamiento del sistema para crecidas mayores a las utilizadas en el diseño, permitiendo la clara zonificación del riesgo de inundación, conocimientos sumamente útil para los planificadores de los ambientes urbanos.

Técnicas Hidrológicas utilizadas en los Modelos

Todas las formas de modelo hidrológico mostradas en la Fig. 1. han sido aplicadas en prácticas de drenaje pluvial urbano. El método racional es el ejemplo más común de un modelo simple (Fig. 1.b). Un importante problema que concierne a método racional y a otros es la determinación del tiempo de concentración. En estos casos fueron utilizadas formulaciones empíricas para flujo permanente sobre superficies planas.

Una mejor resolución se logra empleando modelos como el esquematizado en la Fig. 1.c. Estos constan de un modelo de pérdidas y uno de ruteo y se aplican a una serie de intervalos de tiempo para producir un hidrograma a partir de un hietograma (Fig. 5). Estos modelos de producción de hidrogramas permiten la simulación determinística de la transformación lluvia-caudal, no siendo esto posible con aproximaciones tipo método racional.

Las pérdidas comunmente incluídas son : pérdida inicial (almacenamiento en depresiones) y un pérdida continua. Las formulaciones generalmente utilizadas son las de Horton, Green-Ampt, Richards y Servicio de de Conservación de Suelos.

Los modelos de ruteo generalmente utilizan el método tiempo-área, procedimiento de hidrograma unitario, embalses lineales y no-lineales, método de ruteo hidráulico como por ejemplo onda cinemática, y Muskingum-Cunge

El modelo CELDURB (Riccardi, G.,1997) permite la simulación de tránsito en cualquier componente del sistema mediante la aproximación de onda difusiva de las ecuaciones de Saint-Venant.

Los modelos de pérdidas y ruteo más comunes pueden dar buenos resultados. Pero un mayor grado de detalle se logra con la incorporación de complejos algoritmos de infiltración y tránsito hidrodinámico, en teoría estos modelos son superiores pero afrontan el problema de la relevancia de las hipótesis del modelo con la situación real y la estimación de los valores más apropiados de los parámetros. La aplicación de los modelos más complejos como el de la Fig. 1.d (por ejemplo el SWMM) es llevada a cabo mayormente por investigadores y para los estudios más detallados de contaminación. Estos modelos logran los mejores resultados hidrológicos, pero requieren una importante cantidad de datos y esfuerzo de aplicación en comparación con aquellos más simples. En general los ingenieros proyectistas usuarios de modelos son reacios a realizar un delicado balance entre los simples y complejos, optando por los primeros.

En lo que concierne al caudal de diseño, los modelos que producen hidrograma son preferibles si la información disponible lo permite a la aproximación del método racional que solo informa respecto al caudal máximo. Varios países han adoptado diferentes tipos de estándares para tormentas de diseño para proyecto hidrológico. Esta postura es cuestionada por aquellos que proponen el modelado continuo como Linsley (1978), quien recomienda procedimientos de diseño basados en simulación computacional con series de tiempo de lluvia registradas a largo plazo.

El modelado de factores ambientales ha expandido la naturaleza de los datos hidrológicos de entrada requeridos para diseño y testeo. Los caudales máximos se derivan a partir de datos de eventos de tormenta. Las duraciones de las tormentas de proyecto coinciden con el tiempo de concentración de la cuenca y no supera en general la duración de un evento. En cambio en el modelado para las prácticas de gestión óptima (BMPs) para el control de contaminantes y/o flujo o en sistemas de drenaje combinados deben utilizarse datos que superan la duración de una tormenta. Los eventos en este caso pueden ser semanas o meses. En algunos países se han desarrollado series de secuencias especiales de tormentas representativas para el análisis de sistemas combinados y BMPs.

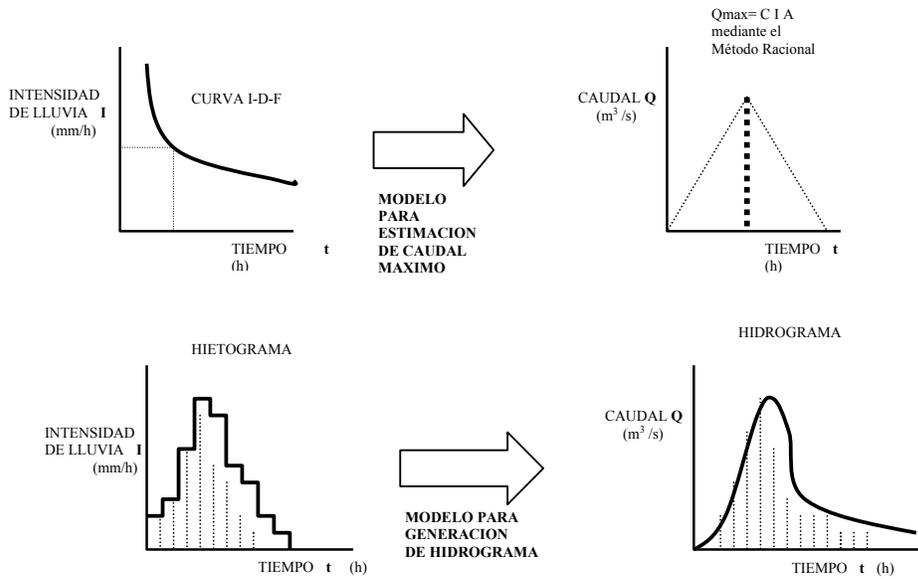


Figura 5. Modelos Lluvia-Caudal para generación de Caudal Máximo e Hidrogramas

LIMITACIONES EN EL ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO DEL MODELADO HIDROLOGICO-HIDRAULICO

De acuerdo a la revisión bibliográfica realizada se ha constatado la existencia de diversos modelos y sistemas de modelación, comerciales y no comerciales que abordan la problemática hidrológica-hidrodinámica urbana. En la actualidad las mayores limitaciones en el modelado hidrológico-hidráulico de procesos de lluvia-escorrentía están vinculados a:

Insuficiencia de Datos: Esta es una de las mayores limitaciones, especialmente en los países en desarrollo. Las autoridades son reticentes a poner en marcha y financiar programas de medición de variables hidrológicas e hidráulicas a largo plazo. Si bien los efectos sobre el escurrimiento de los procesos de urbanización se conocen, existen en el mundo pocas mediciones respecto a la cuantificación de la influencia. Muchas conclusiones se basan en proyecciones de modelos y no en datos ciertos. La escasez de datos limita la proyección estadística y estocástica. En general se estima necesario por lo menos información de 10 años de registros.

Variabilidad de lluvia: A través de experiencias se han comprobado errores en las respuestas de los modelos respecto a las hipótesis de lluvia uniforme espacialmente. Está demostrado que en zonas urbanas puede existir variabilidad de distribución espacial de lluvias en cuencas menores a 1km^2 . La variabilidad espacial es un reflejo de los mecanismos de producción de tormentas, por lo tanto puede existir la uniformidad de algunas tormentas, pero en otras no dependiendo de las dimensiones relativas de las cuencas y las celdas de tormentas. Asimismo cuando se cuente con desagregación espaciales de lluvia es necesario contar con modelos hidrológicos-hidráulicos que permitan trabajar con esas lluvias y transformar la información a escurrimiento.

Influencia de detalle temporal: En general se cuenta con curvas I-D-R con intervalos mínimos de 5 a 10 minutos. Pues bien existen cuencas con tiempos de concentración menores, por lo que las aproximaciones con tiempos menores pueden acompañar a subvaluar el escurrimiento. Además en el análisis de mecanismos de movilización y removilización de contaminantes urbanos, y el transporte de sedimentos se ha verificado que dependen fundamentalmente de lluvias de corta duración e intensidad importante. En algunas ciudades se ha comprobado que un 70 a 80% de las tormentas anuales producen los efectos de movilización de contaminantes y sedimentos. Estos eventos son de baja recurrencia por lo que no "aparecen" descritos en las I-D-R. Por lo tanto esta información históricamente utilizada en el proyecto de obras estructurales resulta insuficiente a la hora de la definición de medidas no estructurales. Para este caso es necesaria la información detallada tanto de intensidad como de infiltración.

Incompatibilidad de los Modelos: Los modelos más habitualmente usados para diferentes escalas de cuenca (Figura 6) tienen generalmente desarrollos independientes y es difícil obtener resultados consistentes cuando son agregados resultados desde un número de pequeñas unidades y comparados con resultados desde una extensa unidad simple que incluya a todas las pequeñas.

NECESIDADES Y ORIENTACION DE LAS ACTUALES LINEAS DE INVESTIGACION

De acuerdo al análisis de la cantidad de trabajos reportados en los congresos internacionales de la disciplina, el interés en los procesos lluvia-escorrentía ha disminuído porcentualmente en relación al total de trabajos presentados. Se ha evidenciado (al menos en las actividades reportadas en congresos internacionales) un desplazamiento de las temáticas de investigación desde la estimación de caudales máximos hacia la problemática de controles a tiempo real y modelado de polución.

Las actuales líneas de investigación están orientadas principalmente a:

Mejoramiento de nivel de detalle: Con las actuales capacidades de computadoras es posible aumentar el nivel de detalle en cuenca. En áreas de 1km^2 aproximadamente en promedio existen 100.000 elementos constitutivos de los sistemas de drenaje pluvial entre los que se cuenta secciones de conductos, cámaras, sumideros, zanjas, cunetas, etc. Si bien las capacidades de computadoras son muy grandes es imposible representar al detalle individual de cada elemento. El nivel de detalle actual es del orden de 10 a 100 elementos, para aumentarlo es necesario la desagregación de los procesos y los modelos de simulación que permitan tal desagregación.

Efecto de Escala: Si bien en términos teóricos un simple modelo hidrológico puede aplicarse en todas las escalas, existen evidencias que las grandes cuencas responden menos directamente ante las señales de entrada (lluvias) que las pequeñas, debido al efecto de promediado de muchos procesos y componentes existentes en grandes cuencas. Si las características del escurrimiento en cuenca pudieran ser explicadas matemáticamente usando fractales (pequeñas subcuencas con similares patrones de comportamiento hidrológico e hidráulico) u otros medios, los procesos de modelado podrían ser simplificado y unificados para aplicación en todas las escalas.

Variabilidad espacial de lluvias: Esta parece ser la mayor fuente de error en procesos de calibración y explotación de modelos y en etapas de consideraciones de hipótesis de proyectos. Existen muchas cuestiones desconocidas que se están estudiando tales como la variabilidad espacial y temporal de lluvias y sus efectos sobre el escurrimiento, el movimiento de tormentas, estimación de lluvia promedio de cuenca, factores de reducción areal y diseño de redes de dispositivos de mediciones. Como ya fuera mencionado los procesos de transporte de sedimentos y contaminantes son dependientes del escurrimiento y fuertemente afectado por los eventos de corta duración (y alta intensidad).

Integración de modelos y Modelación Continua: Se requieren modelos integrados que permitan simultáneamente el modelado hidrológico y el funcionamiento hidráulico, contemplando las escalas de cuenca y los niveles de detalle. Además ya se plantea la necesidad para la integración con el escurrimiento subterráneo. En el caso de los modelos de simulación continua, éstos tienen la potencialidad de superar las incertidumbres de los modelos de eventos relacionadas con el antecedente (humedad de suelo, estado de los almacenamientos superficiales, niveles de acuífero, etc.) y otros problemas relacionados con la estandarización de patrones de lluvias. En general los ingenieros proyectistas no han utilizado este tipo de modelación. Se entiende que de mejorarse la calidad y cantidad de información se podrán utilizar los modelos de simulación continua.

Integración con sistemas de información: Con el desarrollo de sistemas de información como la geográfica, y las herramientas de la hidroinformática, existirá una ventaja en la integración de modelos con tales sistemas, como por ejemplo la extracción directa de datos de cuenca, redes de conductos y canales desde bases de datos urbanas.

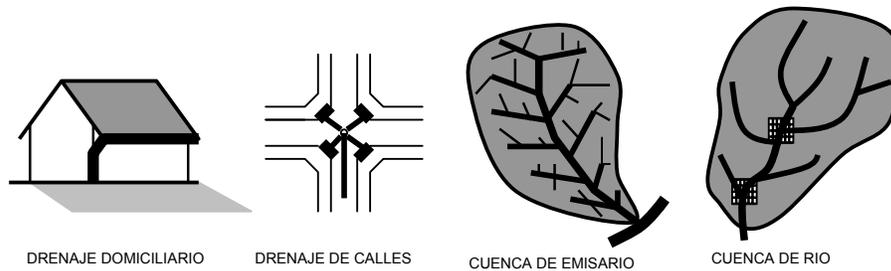
Infiltración: Mejoramiento de técnicas para cuantificación de infiltración y otras abstracciones para las superficies generalmente heterogéneas de las cuencas urbanas.

Mejoramiento de simulación hidráulica: desarrollo de modelos hidráulicos confiables (no demasiados complicados) que puedan ser usados para simular escurrimiento pluvial, particularmente casos de flujos en uniones, y efectos de remanso, los cuales son muy importantes en redes de drenaje (especialmente en zonas de llanura).

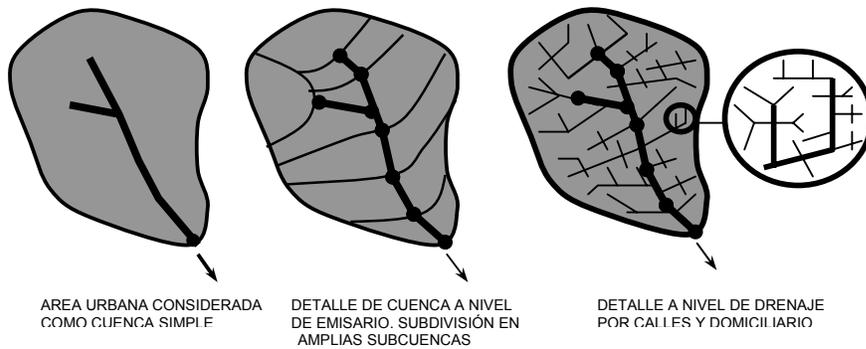
Simulación de Prácticas de Gestión Óptima (BMPs): Es necesario el mejoramiento de técnicas de simulación de detención y retención en embalses y microembalses urbanos, canales urbanos con vegetación, y otras BMPs con consideración más real de la hidrodinámica y la mecánica de transporte y sedimentación de sólidos y contaminantes.

Conceptos de probabilidad: Se deben incorporar conceptos probabilísticos en el manejo de problemas de drenaje, particularmente para definir las incertidumbres de proyecto y operaciones en tiempo real.

Consideraciones de Optimización y Riesgo en el diseño, operación y gestión de los sistemas de drenajes pluviales urbanos.



(a) Distintas Escalas de Cuenca para Sistemas de Drenaje Pluvial urbano



(b) Niveles de detalle de la Descripción del mismo Sistema de Drenaje Urbano

Figura 6. -Ejemplos de Efectos de Escala en Sistemas de Drenaje Urbano

BIBLIOGRAFIA

American Society of Civil Engineers (ASCE) and Water Environment Federation (WEF) (1992). *Design and Construction of Urban Stormwater Management Systems*, ASCE Manuals and Reports of Engineering Practice No. 77, WEF Manual of Practice FD-20; American Society of Civil Engineers, New York

Bertoni, J.; Pedrazza, R.; Collins, J.; Macor, J; Pusineri, G.; Ocampo, C.; Mazza, J.; y Secchi, A. (1995)., *Sistemas de Drenaje Urbano*, Inédito, Curso sobre Drenaje Urbano, Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe

Chow, V.T.; Maidment, D.R. y Ways, L.W. (1987) *Hidrología Aplicada*, McGraw-Hill, Buenos Aires

Codner, G.P., Laurenson, E.M., and Mein, R. (1988) *Hydrologic Effects of Urbanization: A case Study*, Institution of Engineers, Australia, Hydrology and Water Resources Symposium, Canberra

Dolz, J.; Gomez, M. y Martin, J. (editores) (1992) *Inundaciones y Redes de Drenaje Urbano*, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona

O'Loughlin, G.; Huber, W.; and Chocat, B. (1996) *Rainfall-runoff processes and modelling*, Journal of Hydraulic Research, Vol. 34, p.733-752

Hall, M.J. (1984) *Urban Hydrology*, Elsevier Applied Science Publishers, London

Hollis, G. (1975) *The effect of Urbanization on Floods of Different Recurrence Interval*, Water Resource Research, Vol. 11, p. 431-435

Izzard, C.F. (1946) *Hydraulics of Runoff from Developed Surfaces*, U.S. National Research Council, Highway Research Board, Proceedings, Vol. 26, p.129-150

- Kibler, D.F. (editor) (1982)** *Urban Stormwater Hydrology*, Water Resources Monograph, American Geophysical Union, Washington, D.C.
- Linsley, R.K. (1978)** *Urban Storm Drainage*, in *Urban Storm Drainage* (ed. by P.R. Helliwell), International Conference, Southampton, Pentech Press, London.
- Mazza, J.; Fornero L.; Litwin, C.; y Fernandez, P. (1994)** *Modelo AR-HYMO, Manual del Usuario*, INCYTH-CRA y CFI, Mendoza
- Riccardi G. (1994)** *Un Modelo Matemático Hidrodinámico cuasi-bidimensional para escurrimiento cuasi-dinámicos*, XVI Congreso Latinoamericano de Hidráulica, IAHR-LAD, Santiago
- Riccardi G. (1995)** *Mathematical Modelling of flood for the delimitation of rural, semiurbanized and Urbanized zones with inundation risk*, International Symposium on Runoff Computations for Water Projects, IAHS, San Petesburgo
- Riccardi G. Zimmermann E. y Navarro R. (1997)** *Zonification of Areas with Inundation risk by means of Mathematical Modelling in the Rosario Region, Argentina*, Red Book, IAHS Publication Nro 238, ISSN 0144-7815, Wallingford,UK
- Riccardi G. (1997)** *The mathematical modelling of flood propagation for the delimitation of inundation risk zones*, Red Book, IAHS Publication Nro 240, ISSN 0144-7815, Wallingford, UK
- Riccardi G. (1997)** *El Mapeo de Riesgo de Inundación por medio de la Modelación Matemática Hidrodinámica*, Revista Ingeniería del Agua, Vol 4 N° 3 Septiembre 1997, ISSN 1134-2196, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia
- Riccardi G. (1997)** *Desarrollo de un Modelo Matemático de Simulación Hidrológica-Hidráulica apto para escurrimiento a superficie libre y en conductos cerrados: CELDURB (1er. Avance)*, Inédito, Informe Anual, Consejo de Investigaciones, Universidad Nacional de Rosario, Rosario
- UDFCD (1967-1992)** *Urban Storm Drainage Criteria Manual: Vol. 1, 2 y 3*, Urban Drainage and Flood Control District, Denver,CO
- UNESCO (1978)** *Manual on Drainage in urbanized areas: Vol.I y II*; Edited by Geiger W., Marsalek J., Rawls W. and Zuidema F., United Nations Educational Scientific and Cultural Organization, Paris
- Villanueva, A. (1990)** *Modelo para escoamento nao permanente em una Rede de Condutos*, Tesis de Maestría, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre