

IAHR

AIIH

**XXIV CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
PUNTA DEL ESTE, URUGUAY, NOVIEMBRE 2010****HACIA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO HIDROLÓGICO
OPERATIVO CON FINES DE ALERTA CONTRA INUNDACIONES**

Baldemar Mendez-Antonio¹, Gabriel Soto-Cortes¹, Fabián Rivera-Trejo², Darío Guaycochea-Guglielmi¹, Eliseo Carrizosa-Elizondo³, Ramón Domínguez Mora³

¹Departamento de Energía, Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, Av. San Pablo 180, Col. Reynosa Tamaulipas, C.P. 02200, Azcapotzalco, México, D.F., México. bma@correo.azc.uam.mx

²Departamento de Energía, Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, Av. San Pablo 180, Col. Reynosa Tamaulipas, C.P. 02200, Azcapotzalco, México, D.F., México. gsc@correo.azc.uam.mx

³DAIA, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Cunduacán Jalpa de Méndez, Col. La Esmeralda, C.P. 86690, Cunduacán, Tabasco, México. jose.rivera@daia.ujat.mx

⁴Departamento de Energía, Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, Av. San Pablo 180, Col. Reynosa Tamaulipas, C.P. 02200, Azcapotzalco, México, D.F., México. deg@correo.azc.uam.mx

⁵Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. Coyoacán, México D. F., México. ecae@pumas.iingen.unam.mx

⁶Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. Coyoacán, México D. F., México. rdm@pumas.iingen.unam.mx

RESUMEN:

Con el objetivo de implementar un Sistema de Alerta contra Inundaciones, se presenta aquí una metodología para el establecimiento de un modelo hidrológico operativo, alimentado a tiempo real con precipitaciones estimadas a partir de datos de radar meteorológico. Se empleó la cuenca experimental del río Mixcoac, localizada al poniente de la Ciudad de México y el radar meteorológico del cerro Catedral para la implementación del modelo. Este tipo de modelos son necesarios en cuencas donde la topografía son muy escabrosas y ocasionan avenidas súbitas que afectan a las poblaciones, a diversos sectores económicos e infraestructura de transporte y telecomunicaciones. Poseer un Sistema de Alerta de este tipo ayuda y a los tomadores de decisiones, en áreas como la de Protección Civil e instituciones responsables, a activar los protocolos de medidas de seguridad para mitigar los efectos provocados por las inundaciones.

ABSTRACT:

In order to implement a Flood Warning System, a methodology for the establishment of an operational hydrological model is presented here. The model is fed with real-time precipitation estimates from weather radar data. The Mixcoac River experimental watershed, located west of Mexico City and, Cerro Catedral weather radar for the implementation of the model was used. Such models are needed in basin where the topography is very rugged and cause flash floods affecting populations, to several economic and transport and telecommunications infrastructure. Owning a warning system of this kind helps stakeholders, in areas such as Civil Protection and institutions responsible, to activate the security measures protocols to mitigate the effects caused by the floods.

PALABRAS CLAVES: Sistemas de alerta temprana, Percepción Remota, modelos hidrológicos operativos, pronóstico operativo de inundaciones.

Introducción

Los sistemas de alerta temprana son un herramienta indispensable en la prevención de desastres hidrometeorológicos. La percepción remota (radar y satélite meteorológico), aumenta la disponibilidad de datos de lluvia y mejora su calidad, pasando actualmente del campo de la investigación al de producto operativo tanto para hidrología como para meteorología. El empleo de estos instrumentos de percepción remota representa una oportunidad de desarrollo de este tipo de sistema para uso en campos como la hidrología, la meteorología, la agricultura y en Protección Civil, particularmente en su empleo en Sistemas de Alerta Temprana contra Inundaciones.

Sobre este tema, las Naciones Unidas (ONU, 2006), a través de la Estrategia Internacional de Reducción de Desastres (ISDR por sus siglas en inglés), define a la Alerta Temprana como "el suministro de información oportuna y eficaz, mediante instituciones, que permite a los tomadores de decisiones tomar medidas para evitar o reducir riesgos y prepararse para una respuesta eficaz.", y se integra de cuatro elementos principales:

- 1. Conocimiento del riesgo:** La evaluación de riesgos proporciona información esencial, para establecer prioridades, para la mitigación y estrategias de prevención y diseño de sistemas de alerta temprana.
- 2. Monitoreo y Predicción:** Sistemas con capacidades de seguimiento y predicción proporcionan estimaciones puntuales del riesgo potencial que enfrentan las comunidades, las economías y el medio ambiente.
- 3. La difusión de la información:** Los sistemas de comunicación son necesarios para la entrega de mensajes de advertencia a los lugares que puedan resultar afectados para alertar a las agencias gubernamentales locales y regionales. Los mensajes tienen que ser fiable, sintética y simple para ser entendido por las autoridades y el público.
- 4. Respuesta:** La coordinación y planes de acción adecuados son un punto clave en efectivo de alerta temprana. Del mismo modo, la conciencia pública y la educación son aspectos fundamentales de la mitigación de desastres.

La falla de cualquier parte del sistema implicará el fracaso de todo el sistema (Grasso, V., sin fecha).

Así, el objetivo del estudio realizado y planteado aquí es presentar la metodología para el establecimiento de un modelo hidrológico operativo, del tipo lluvia-escorrentamiento, alimentado con datos de radar meteorológico que sirva de base a un Sistema de Alerta Temprana contra Inundaciones.

Antecedentes

En hidrología tradicional los modelos de pronóstico generalmente se quedan a nivel de diagnóstico y el producto final es un informe escrito poco accesible fuera del ámbito técnico y de las instituciones involucradas en el estudio. Lo anterior se debe no a la falta de capacidad ni de conocimiento en hidrología, sino a la de herramientas capaces de proporcionar estimaciones de lluvia a tiempo real de tal manera que, del diagnóstico de los procesos hidrológicos que ocurren en una cuenca, se pase a un modelo operativo que permita conocer anticipadamente su respuesta en el momento preciso en que un evento de lluvia intensa se presente. El radar meteorológico es un instrumento que proporciona estimaciones del campo de lluvia a tiempo real y que puede emplearse en la modelación hidrológica operativa.

Así, un reto para los hidrólogos es utilizar datos de radar para resolver problemas que involucren grandes áreas y el análisis de sistemas hidrológicos a tiempo real. Estas aplicaciones tienden a maximizar la capacidad de los radares para atacar problemas que no pueden resolverse por métodos convencionales. Especialmente, cuando se trata del sistema de adquisición de datos, donde los

sistemas convencionales registran sólo datos puntuales, tardan semanas o meses en estar disponibles y la mayoría de las ocasiones no son de fácil acceso. Como consecuencia, el conocimiento de los procesos hidrológicos involucrados se conocen, en el mejor de los casos, mucho tiempo después de ocurridos, y en el peor, nunca, debido principalmente a la falta y dispersión de los datos. Precisamente, las características de los datos define el nivel de procesamiento y análisis de los procesos hidrológicos. Así, para datos puntuales en una cuenca con poca densidad de estaciones de superficie sólo cabe el análisis temporal de los procesos que ocurren dentro de la cuenca. En cambio, los datos que proporcionan instrumentos de Percepción Remota como los satélites y el radar, los cuales tienen la capacidad para estimar la variabilidad espacial de la lluvia, permiten someter la cuenca a un análisis hidrológico tanto temporal como espacial. La ventaja de este último método es que se toma en cuenta la variabilidad espacial de las propiedades físicas de la cuenca y como consecuencia, se puede conocer la respuesta de la cuenca ante un evento, en cualquier punto de la cuenca, una vez determinado el modelo hidrológico. El modelo hidrológico empleado es del tipo distribuido, con el fin de aprovechar la capacidad que tiene el radar de proporcionar estimaciones de la variabilidad espacial de la precipitación.

Adicionalmente, este tipo de técnicas utiliza los Sistemas de Información Geográfica y de Percepción Remota, generando mapas geo-referenciados de los productos que se obtienen. Esto sirve de ayuda en la interpretación de los resultados y se convierte en una herramienta útil para los tomadores de decisiones.

Metodología

El establecimiento de un Sistema de Alerta Temprana contra Inundaciones es un proceso que tienen múltiples componentes, desde la estimación de datos de lluvia a partir de datos de radar, hasta la modelación hidrológica operativa. Es necesario que los datos que alimenten al sistema sean a tiempo real, pues es la base de éste, de no ser así, la herramienta en cuestión se convierte en un sistema de diagnóstico.

Con el propósito de mostrar claramente el proceso a seguir en la implementación de este sistema, éste se resume de forma esquemática en el diagrama de la figura 1 y se explica a continuación cada uno de sus componentes.

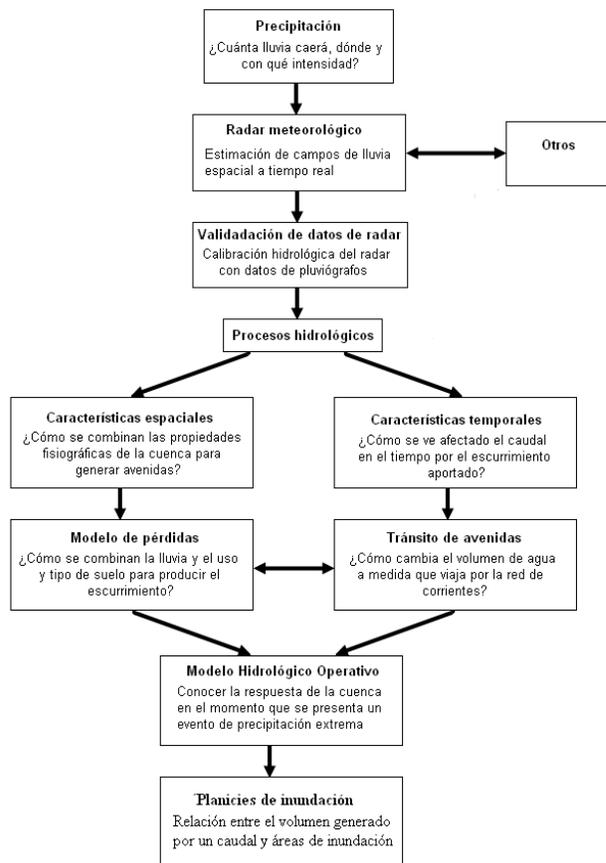


Figura 1.- Proceso de predicción hidrológica operativa.

Precipitación

Para el análisis se requiere de las observaciones de lluvia registradas por las estaciones de superficie (pluviógrafos) para la validación de los datos de radar. Estas estaciones de preferencia deben ser automáticas. Es decir, que puedan transmitir los datos a tiempo real pues esto ayuda a incluir dentro del sistema un algoritmo de autocalibración o calibración a tiempo real. En caso de no ser así, se puede obtener la calibración del radar meteorológico a partir de datos históricos. Se debe ser muy riguroso en esta calibración pues de ello depende la mayor o menor certidumbre de los datos estimados de precipitación que alimentará al modelo hidrológico a tiempo real.

Conocer la localización de la precipitación y donde se presenta la mayor intensidad requiere necesariamente de definir primero el área de estudio.

Área de estudio

El caso de estudio seleccionado corresponde a la cuenca del río Mixcoac, ubicada en el poniente de la Ciudad de México, México (Figura 2). Este es un río de montaña, con escurrimientos bajos en periodo de secas y con avenidas súbitas en períodos de lluvia. Éstas últimas se presentan con frecuencia en la zona debido a la convección provocada por la orografía del sitio (Magaña *et al.*, 2003). Se seleccionó esta cuenca debido a que su tipo de respuesta ocasiona grandes daños y a que disponía de datos de escurrimientos, con un radar meteorológico, ubicado en el cerro Catedral a 35 km de la cuenca de estudio (Figura 3) y de precipitación estimados con parte de la red de 78 pluviógrafos que opera el Gobierno de la Ciudad de México. La red completa se utilizó en la calibración hidrológica del radar. Esta disponibilidad de datos hizo posible también establecer una relación entre la lluvia y los escurrimientos para obtener el modelo hidrológico de la cuenca.



Figura 2.- Localización de la cuenca del río Mixcoac

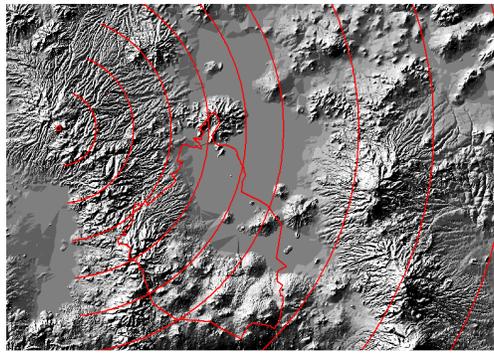


Figura 3.- Topografía y localización del radar del Cerro Catedral

Radar Meteorológico

El conocimiento de los campos de lluvia a tiempo real, para conocer cuándo, dónde y con qué intensidad se presenta este tipo de eventos, requiere de datos de lluvia estimados con radar meteorológico. Esta capacidad y la de estimar la distribución o variabilidad espacial de la lluvia dentro de su radio de cobertura lo hace un instrumento ideal para la modelación hidrológica operativa.

Validación de datos de radar

El empleo de lluvia de radar en hidrología precisa de la validación de sus datos, ya que el radar no mide directamente ésta y para su estimación se vale de la relación entre la reflectividad Z , medida a partir de la potencia recibida, la cual está relacionada con la distribución de tamaños de gotas, detectadas en el volumen de muestreo, y la intensidad de la lluvia R medida en los pluviógrafos (Méndez, 2006). Debido a la dificultad para determinar la distribución de tamaños de gotas dentro del volumen mencionado, se han obtenido diversas relaciones del tipo $Z = AR^b$ (Rosengaus, 1995). En este estudio se tomó la calibración del radar meteorológico del cerro Catedral realizada por Méndez *et al.* (2006), quienes obtuvieron la ecuación:

$$\overline{Z}_{i,t} = 300R^{1.3} \quad [1]$$

donde t es el intervalo de tiempo que se está relacionando con R (mm/h) y Z (mm^6/m^3); i la localización espacial de la celda del radar que corresponde con las del pluviógrafo i de coordenadas X_i, Y_i ; 300 y 1.3 son parámetros de calibración obtenidos con el radar y los pluviógrafos para la zona

de la Ciudad de México; y $\overline{Z}_{i,t}$ es el promedio de la reflectividad Z que se obtuvo mediante la ecuación

$$\overline{Z}_{i,t} = \frac{1}{n} \sum_{n=1}^9 Z_{i,t} \quad [2]$$

donde n es el número de celdas promediadas en una matriz de celdas de 3x3. Bajo este criterio, la celda del centro de la matriz de 3x3 ($\overline{Z}_{i,t}$) tiene las mismas coordenadas que el pluviógrafo (Figura 4).

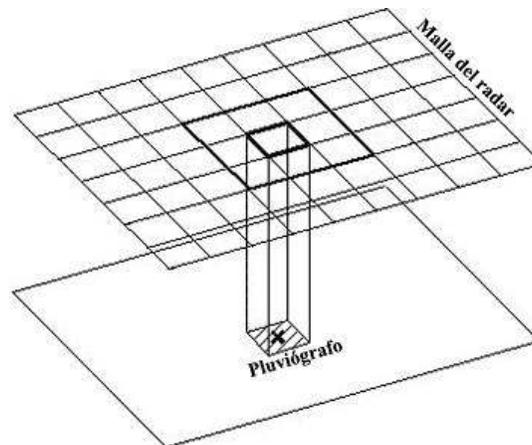


Figura 4.- Localización del pluviógrafo con respecto al centro de la matriz promediada de Z .

Procesos hidrológicos

En esta etapa es necesario definir los procesos hidrológicos que ocurren dentro de una cuenca y así conocer la respuesta de la cuenca ante cualquier evento de precipitación. Este es un paso importante ya que este conocimiento ayuda a la prevención por los efectos de los escurrimientos. Desde este punto de vista se puede establecer la respuesta de la cuenca en un modelo hidrológico, como función de la variabilidad espacial de sus propiedades físicas y del tiempo de viaje de los escurrimientos, desde cualquier sitio de la cuenca hasta su salida.

Característica espacial

Conocer el comportamiento espacial de los procesos hidrológicos dentro de la cuenca es una de las dos principales componentes que se deben considerar a la hora de modelar hidrológicamente la cuenca. En esta etapa se determina los escurrimientos a partir de un modelo de pérdidas que toma en cuenta el uso y tipo de suelo. En la determinación del escurrimiento se utilizó, por su sencillez y representación física, el método del *Soil Conservation Service* (SCS; hoy llamado: *Natural Resources Conservation Service*) o Número de Curva (NC) (Mishra and Singh, 2002), el cual está definido mediante la ecuación:

$$P_e = \frac{\left(P - \frac{508}{CN} + 5.08 \right)^2}{P + \frac{2032}{CN} - 20.32} \quad [3]$$

La ecuación anterior considera el uso y tipo de suelo que posee la cuenca, la cual se divide en una malla de celdas (Figura 5), de tal manera que corresponda a la que forma el radar en su barrido, donde cada celda representa un tanque; parte de la lluvia que se precipita en cada

uno de los tanques (celdas) se infiltra y parte se convierte en escurrimiento (Figura 6). Evidentemente, el concepto anterior corresponde a un modelo hidrológico del tipo distribuido (Figura 6).

Conociendo el tipo y uso de suelo de la cuenca y la precipitación a tiempo real para estimar los escurrimientos en cada celda por medio de la ecuación [3] de forma automática no es complicado.

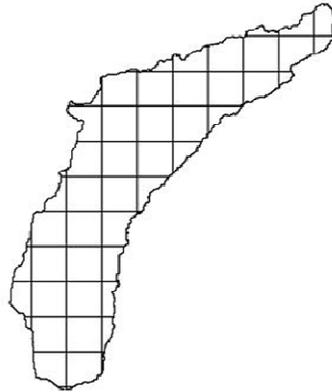


Figura 5.- Intercepción de la malla del radar sobre la cuenca

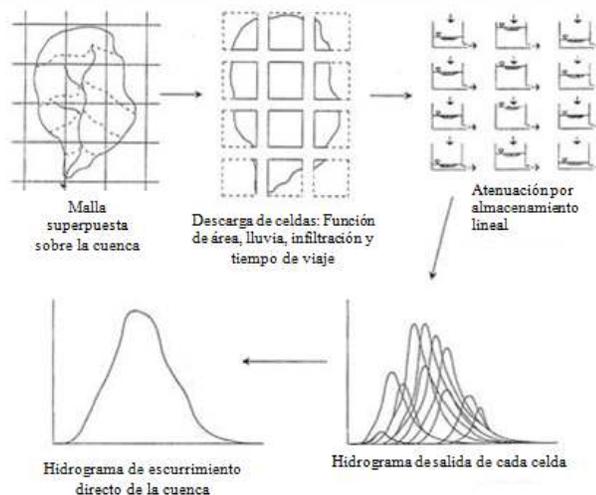


Figura 6.- Modelo de escurrimiento directo conceptual para parámetros distribuidos

Característica temporal

Con base en la variabilidad espacial de las propiedades fisiográficas de la cuenca y de los campos de lluvia se puede conocer el tiempo y tipo de respuesta de la cuenca. La estimación de esta respuesta se realiza mediante un tránsito hidrológico. El traslado del escurrimiento desde cualquier punto de la cuenca hasta su salida se modela por medio de una agregación simple a través del hidrograma unitario distribuido o hidrograma unitario de Clark Modificado (Kull and Feldman, 1998).

En este concepto, el objetivo es transitar el escurrimiento obtenido anteriormente en cada una de las celdas, con el método del número de curva, hasta la salida de la cuenca. Se puede realizar por medio de un tránsito hidrológico o uno hidráulico. Como se mencionó anteriormente, el método utilizado en este análisis fue hidrológico. La respuesta total de la cuenca es la suma de las respuestas parciales de cada una de las celdas (Figura 6).

Obtenido el tiempo de viaje se pueden estimar las isócronas en la cuenca para determinar el tiempo de viaje de los escurrimientos hasta la salida de ésta (Figura 7).

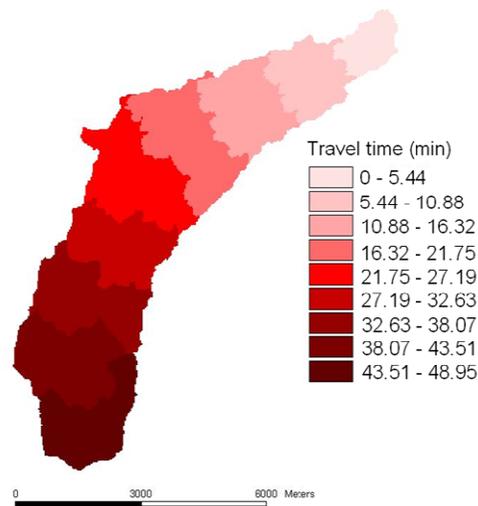


Figura 7. Tiempo de viaje del escurrimiento hasta la salida de la cuenca

Estas curvas se obtienen a partir de la ecuación de Kirpich:

$$t_c = 0.000325 \left(\frac{L^{0.77}}{S^{0.385}} \right) \quad [4]$$

donde

- t_c tiempo de concentración (horas):
- L longitud del cauce principal (m.)
- S pendiente media de la cuenca (adimensional)

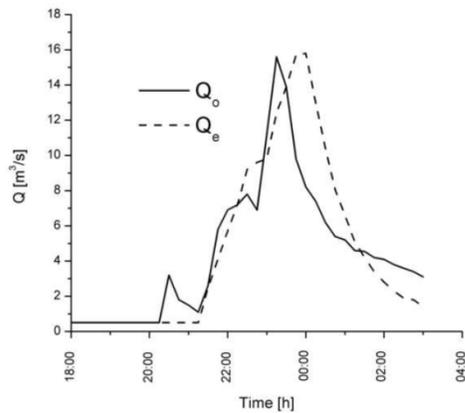
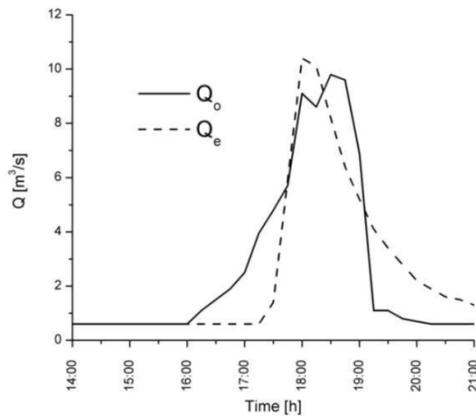
Modelo hidrológico operativo

En esta etapa se determina primero el modelo hidrológico de la cuenca, el cual permite estimar la respuesta de la cuenca ante un evento de precipitación. Para la cuenca de estudio, se analizaron dos tormentas (28 de julio y 23 de agosto de 1998), las únicas disponibles, para calibrar el modelo hidrológico con datos de radar meteorológico. El modelo determina seis parámetros (Tabla 1), como se ve, la única variación es en el parámetro que se relaciona con la infiltración. Este es un problema aún no resuelto en hidrología que puede reducir su efecto si se modela de forma continua, en vez de hacerlo por evento, como se hizo en este estudio.

Los resultados de los hidrogramas observados y estimados a partir del modelo alimentado por radar se muestran en las figuras 8 y 9. Este modelo es posteriormente alimentado automáticamente y a tiempo real por datos estimados de lluvia del radar meteorológico. De esta manera se implementa el modelo hidrológico operativo, parte primordial en un Sistema de Alerta contra Inundaciones.

Tabla 4.4 Parámetros resultantes para cada una de las tormentas

FECHA	PARÁMETROS DEL MODELO DE CUENCA						
	Razón de infiltración Inicial	Factor de Escala de Retención Potencial	t_c	Coefficiente de Almacenamiento	Qbase inicial	Constante de Recesión	Umbral del Qbase
28JULIO98	0.6	0.125	0.25	1.0	0.6	0.8	0.1
23AGO98	0.6	0.41	0.25	1.0	0.6	0.8	0.1
28JULIO98	0.6	0.22	0.25	1.0	0.6	0.8	0.1
23AGO98	0.6	0.46	0.25	1.0	0.6	0.8	0.1

Figura 8.- Hidrograma de salida del 28 de julio de 1998, observado, Q_o , y estimado con radar, Q_e .Figura 9.- Hidrograma de salida del 23 de agosto de 1998, observado, Q_o , y estimado con radar, Q_e .

Planicies de inundación

Adicionalmente al modelo hidrológico operativo, en la implementación de un Sistema de Alerta contra Inundaciones se puede establecer las zonas de riesgo de inundaciones realizando un análisis hidrológico o hidráulico que permita conocer las zonas de inundaciones ante determinado caudal. Los caudales pueden obtenerse por medio de periodos de retorno o avenidas máximas que hayan causado daños importantes en sectores urbanos, agrícolas o ambientales. El área puede definirse en los bordes de los ríos o de las zonas bajas de la cuenca. No se presenta aquí este resultado ya que no

forma parte del modelo hidrológico operativo pero se resalta su importancia en el Sistema de Alerta contra Inundaciones, fin último del modelo hidrológico operativo.

Otros

Como alternativa para alimentar al modelo de pronóstico hidrológico, además del radar meteorológico se pueden emplear estimaciones de lluvia a partir de datos de satélite, que tiene la ventaja de tener mayor cobertura, aunque su resolución es menor al de los radares meteorológicos. Es importante para la modelación de cuencas de gran tamaño.

También es importante considerar los modelos de pronóstico de lluvia, que tienen la gran ventaja de aumentar la ventana de pronóstico, lo que permite tener un mayor margen para la toma de medidas de prevención.

Un punto clave en la construcción de un Sistema de Alerta es la implementación de protocolos de acción de las medidas de mitigación, de adaptación y de respuesta y resiliencia ante eventos extremos. Quienes deben de activar estos protocolos son las instituciones encargadas del funcionamiento hidráulico y de los sistemas de alerta, quienes tienen los recursos humanos y económicos para llevar a cabo, tanto las medidas estructurales y no estructurales del Sistema. En caso contrario, de no existir tal protocolo, toda la modelación y demás partes del sistema de pronóstico de avenidas queda como un simple ejercicio académico.

Conclusiones

Se presenta aquí una metodología para el establecimiento de un modelo hidrológico operativo, alimentado a tiempo real con precipitaciones estimadas a partir de datos de radar meteorológico. Se emplea la cuenca experimental del río Mixcoac, localizada al poniente de la Ciudad de México. La metodología resumida en la figura 3 muestra el empleo del radar meteorológico como una opción que puede aplicarse con éxito en la modelación hidrológica con fines de pronóstico y como parte medular de un sistema de alerta temprana para cualquier cuenca

Referencias

Grasso, V. (sin fecha). “Early Warning Systems: State-of-Art Analysis and Future Directions”. *United Nations Environment Programme (UNEP)*, Draft report.

Kull D. and Feldman A. (1998). “Evolution of Clark’s Unit Graphs Method to Spatially Distributed Runoff”. *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 3, No. 1, pp. 9-19, January.

Méndez B., (2006). “Aplicación hidrológica de los radares meteorológicos”. *Tesis de doctorado*, Universidad Nacional Autónoma de México

Méndez B., Domínguez R., Magaña V., Caetano E. y Carrizosa E. (2006). “Calibración hidrológica de radares meteorológicos”. *Ingeniería Hidráulica en México*, vol. XXI, núm. 4, pp. 43-64, 2006.

Mishra, S. and Singh, V. (2002). “Mathematical model of small watershed hydrology and applications”, in SCS-CN-Based hydrologic simulation Package. *Water Resources Publications*, LLC, Ch. 13.

Rosengaus, M. (1995). “Fundamentos de Radares Meteorológicos: Aspectos Clásicos”. *Revista Ingeniería Hidráulica en México*, Vol. X, No. 1, enero-abril, pp. 55-74