

**XXIII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA  
CARTAGENA DE INDIAS COLOMBIA, SEPTIEMBRE 2008**

**PROGRAMA MODELO DE PRONÓSTICO DE ESCURRIMIENTO  
(MPE)**

*Ramón Domínguez Mora, Gabriela Esquivel Garduño, Baldemar Méndez Antonio,  
Alejandro Mendoza Reséndiz, Maritza Liliana Arganis Juárez, Eliseo Carrizosa Elizondo*  
*Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. México D.F.,*  
[rdominguezm@iingen.inam.mx](mailto:rdominguezm@iingen.inam.mx); [gesquivelg@iingen.unam.mx](mailto:gesquivelg@iingen.unam.mx)

**RESUMEN:**

El programa *Modelo de Pronóstico de Esgurrimiento* (MPE) se desarrolló con el objeto de pronosticar los escurrimientos de una cuenca mediante un modelo de Parámetros Distribuidos. El método empleado para la producción del escurrimiento está basado en el del *Soil Conservation Service* (SCS), con una modificación que permite considerar el secado del suelo después de presentarse una lluvia. La transferencia del escurrimiento se hace con el método de *Clark Modificado*. El programa trabaja con la información de una red de estaciones pluviográficas instaladas en la Cuenca y con los parámetros hidrológicos de la cuenca en forma de malla, obtenidos con la ayuda de un SIG (Sistema de Información Geográfica); con ello es capaz de obtener: la precipitación media en la cuenca, el hietograma, la lluvia en exceso, las pérdidas y el hidrograma a la salida de la cuenca.

**ABSTRACT:**

The program *Forecast of Runoff Model* (MPE) was developed with the intention of foretelling the runoffs of a river basin by means of a Distributed Parameters model. The method used for the production of the draining is based on the method of *Soil Conservation Service* (SCS) with a modification that allows considering the drying of the ground after appearing a rain. The transference of the draining takes control of the *Modified Clark* method. The program works with the information of the installed pluviograph network in the River basin and with the hydrologic parameters of the river basin in mesh form obtained with the aid of the GIS; it is able to obtain: the average precipitation in the river basin, its hyetograph, rain in excess, losses and the hydrograph at the outflow of the river basin.

**PALABRAS CLAVES:**

Modelo Distribuido, Pronóstico de Esgurrimiento, Sistemas de Información Geográfica.

## INTRODUCCIÓN

La modelación de la relación entre precipitación y escurrimiento es un problema básico de la Hidrología. Un modelo adecuado permite una buena estimación de los escurrimientos en una cuenca, los cuales pueden ser utilizados en el diseño de obras para el control de inundaciones o en el pronóstico oportuno, con base en el cual se operen las obras ya construidas o se emitan alarmas para movilizar a la población fuera de la zona de riesgo.

Por muchos años el proceso de transformación de la lluvia en escurrimiento se estudio mediante modelos de *parámetros concentrados*, que son alimentados con valores medios, por lo que no pueden considerar las variaciones espaciales, al interior de la cuenca, del tipo y uso del suelo ni de la precipitación.

El advenimiento de los *Sistemas de Información Geográfica* (SIG) permite ahora dividir la cuenca en partes pequeñas (generalmente celdas cuadradas o “píxeles”) cada una con sus características específicas y, con los modelos numéricos del terreno (MNT), dar seguimiento a las trayectorias que sigue el escurrimiento directo hasta llegar al sitio o a los sitios de estudio.

En cuanto a la distribución espacial y temporal de la lluvia, se tienen algunos avances en las técnicas de interpolación, se cuenta con algunas cuencas experimentales con redes más densas de medición continua, y con el tiempo se ha ido integrando la tecnología de radares meteorológicos, Méndez (2005), para estimar mejor la distribución espacial de la lluvia.

Estas nuevas condiciones están llevando cada vez más al uso de los llamados modelos de *parámetros distribuidos* en los que la producción del escurrimiento se estima en cada una de las celdas y el escurrimiento generado en cada una se transita por la cuenca siguiendo trayectorias individualizadas hasta los sitios de interés.

Se han desarrollado muchos modelos computacionales de cuencas en las últimas tres décadas, como el *HEC-HMS* del Hydrological Engineering Center y el *TR-20* del Servicio de Conservación de Suelos USDA. Estos modelos, llamados modelos de evento, se utilizan para la generación de hidrogramas de crecidas en el análisis y diseño de esquemas de control de flujo. Dentro de los modelos de proceso continuo se encuentran: el *SSARR* del Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los Estados Unidos División Pacífica Norte y el *SWM* desarrollado en la Universidad de Stanford, los cuales se utilizan para diseño hidrológico, predicción de volumen de escurrimiento a largo plazo y predicción de flujo en tiempo real. El *TOPMODEL* (Topographical Model) y el *SHE* son los modelos estándar para análisis hidrológicos en muchos países de Europa.

En el Instituto de Ingeniería de la UNAM se tiene experiencia con algunos de estos programas, principalmente con el *HEC-HMS*; sin embargo, en su aplicación se han encontrado algunos obstáculos que no permiten modelar eficientemente el escurrimiento, como por ejemplo el no considerar las pérdidas por evapotranspiración que se presentan durante el intervalo de tiempo de una tormenta a otra; por eso se consideró necesario hacer el programa *Modelo de Pronóstico de Escurrimiento* (MPE), en el que se aplica la experiencia del Instituto.

El *SIG* que se utiliza para obtener los parámetros hidrológicos de la cuenca es el *ArcView 3.2* en conjunto con la extensión de *Modelación Hidrológica Geoespacial* (HEC-GeoHMS) desarrollada por el Hydrologic Engineering Center, USACE (2003).

## MÉTODOS

La Precipitación Distribuida en la cuenca se obtiene interpolando con el método de *Shepard*, Engeln (1996), la lluvia registrada en la red de estaciones pluviográficas. El método empleado para la producción del escurrimiento está basado en el del *Número de Curva ó SCS* del Soil Conservation Service, Chow (1994), con una modificación que permite considerar el secado del suelo después de presentarse una lluvia, para ello se agregó en el cálculo de la precipitación un parámetro, al que se denominó factor de olvido, el cual hace que la importancia de las lluvias antecedentes vaya disminuyendo conforme pasa el tiempo. Con este parámetro se consideran las pérdidas por evapotranspiración. La transferencia del escurrimiento se hace con el método de *Clark Modificado*, Méndez (2005).

### Modelo de Precipitación. Método de Shepard

La interpolación se realiza con el método de *Shepard*, que consiste en obtener una media pesada de los valores registrados en  $N$  sitios próximos al punto de interpolación, utilizando como peso el inverso de la distancia del punto a interpolar a los puntos dato que le rodean.

$$\phi(x, y) = \sum_{j=0}^N w_j(x, y) h p_j \quad [1]$$

Donde:

$\phi(x, y)$ , punto a interpolar

$N$ , número de estaciones de lluvia

$w_j$ , factor de peso en la estación  $j$

$h p_j$ , lluvia en la estación  $j$

Para el cálculo del factor de peso  $w_j(x, y)$  se utilizan solamente los puntos  $(x_j, y_j)$  de un círculo de radio  $R$  alrededor del punto  $(x, y)$ ; a este procedimiento se le llama método local de Shepard, donde  $w$  se determina con los parámetros de Franke-Little:

$$\xi_j(x, y) = \begin{cases} 1 - \frac{r_j(x, y)}{R} & \text{para } 0 < r_j(x, y) < R \\ & \text{para } r_j(x, y) \geq R \end{cases} \quad [2]$$

$$r_j(x, y) = \sqrt{(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2}, j = 0, \dots, N \quad [3]$$

La ecuación para determinar el factor de peso  $w$  resulta:

$$w_j(x, y) = \frac{\xi_j^\mu(x, y)}{\sum_{i=0}^N \xi_i^\mu(x, y)} \quad [4]$$

Donde:

$R$ , Distancia máxima a considerar para hacer la interpolación

$r_j(x,y)$ , Distancia desde el punto  $(x,y)$  a la estación  $j$

$w_j(x,y)$ , factor de peso en la estación  $j$

### Modelo de Producción del Esguerrimiento. Método de Número de Curva.

El método Número de Curva del *Soil Conservation Service* (SCS-CN) se basa en la ecuación de balance hídrico y en dos hipótesis fundamentales. La primera hipótesis establece que la razón entre el volumen de esguerrimiento directo y el esguerrimiento potencial máximo es igual a la razón entre la infiltración real y la infiltración potencial máxima. La segunda hipótesis establece que la infiltración inicial es una fracción de la retención potencial.

De acuerdo con este criterio la precipitación total y la precipitación efectiva, se relacionan de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$Pe = \frac{\left( P - \frac{508}{CN} + 5.08 \right)^2}{P + \frac{2032}{CN} - 20.32} \quad [5]$$

Donde:

$CN$  es el Número de Curva que depende del tipo y uso del suelo de la cuenca

$P$ , precipitación acumulada total, cm

$Pe$ , precipitación efectiva, cm

### Pérdidas por Evapotranspiración. Factor de Olvido.

Para considerar el secado del suelo después de presentarse una lluvia, se agregó en el cálculo de la precipitación acumulada un parámetro, al que se denominó *factor de olvido*, el cual hace que las aportaciones de las lluvias antecedentes vayan disminuyendo conforme pasa el tiempo. Con este parámetro se consideran las pérdidas por evapotranspiración que se presentan durante el intervalo de tiempo de una tormenta a otra; de lo contrario, cuando se presente un segundo evento de lluvia, el suelo se consideraría saturado y esguerriría todo lo que llueve, lo cual no es real.

Al usar el *factor de olvido*, se calcula una precipitación acumulada “neta”

$$Pa_n = P_1 * fx^{n-1} + P_2 * fx^{n-2} + \dots \dots P_n fx^{n-n} \quad [6]$$

Donde:

$Pa_n$ , precipitación acumulada neta en el intervalo de tiempo  $n$ , cm

$P_n$ , precipitación en el intervalo de tiempo  $n$ , cm

$fx$ , factor de olvido, menor que 1

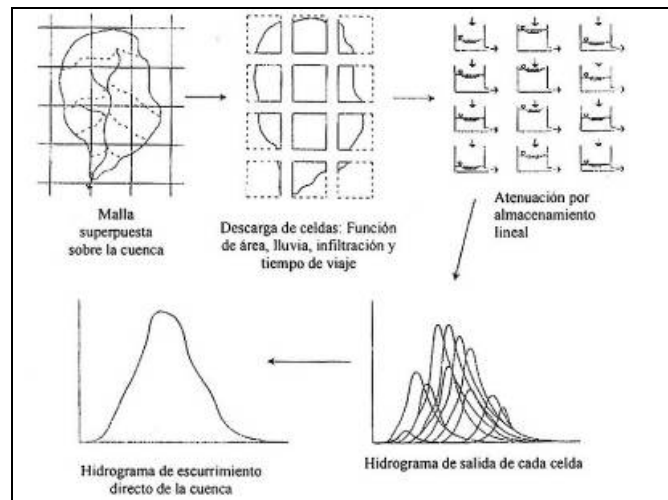
La precipitación acumulada neta se sustituye por la acumulada total  $P$  en la ecuación 5 para estimar la precipitación efectiva.

Cuando se quieren modelar varios días se recomienda:

- Para menos evapotranspiración (mayor escurrimiento), aumentar el valor de  $f_x$
- Para más evapotranspiración (menos escurrimiento), disminuir el valor de  $f_x$
- En cualquier caso,  $0 \leq f_x \leq 1$

**Modelo de Transferencia de escurrimiento. Método de Clark Modificado.**

El método de Clark Modificado consiste en trasladar el escurrimiento producido en cada celda hasta la salida de la cuenca después de transcurrido un intervalo de tiempo igual al tiempo de viaje desde la celda hasta la salida, combinando un mapa de isócronas (curvas de igual tiempo de viaje) con la regulación en un embalse lineal.



**Figura 1.-** Modelo de escurrimiento directo conceptual ModClark para parámetros distribuidos.

El método requiere de tres elementos para la determinación del hidrograma a la salida de la cuenca; el histograma tiempo-área, el tiempo de concentración  $T_c$  y el coeficiente de atenuación por almacenamiento  $K$ .

El *histograma tiempo-área*, representa el área de la cuenca que contribuye al escurrimiento en la salida de la cuenca en un tiempo dado. Esta área se obtiene mediante la determinación de la distancia de viaje desde cada celda hasta la salida de la cuenca. Lo anterior se complementa ya sea estimando el escurrimiento en las laderas y el tiempo de viaje de la corriente principal o simplemente suponiendo una velocidad de viaje constante, dado por la relación entre la distancia del punto más alejado de la salida de la cuenca entre el tiempo de concentración.

Una vez determinado el tiempo de viaje desde cada celda hasta la salida de la cuenca (ecuación 7), el área de la cuenca se divide en zonas de igual tiempo de viaje (isócronas). Al relacionar las áreas entre isócronas con el intervalo de tiempo correspondiente se obtiene el histograma tiempo-área de la cuenca.

En el SIG se obtienen las longitudes de viaje de cada celda, Domínguez et al. (2008), y posteriormente son convertidas por el programa MPE en tiempos de viaje para crear las isócronas que requiere el método de ModClark para la transferencia del escurrimiento.

$$Tt = Tc \times \left( \frac{Lv_N}{Lv_n} \right) \tag{7}$$

Donde:

$T_c$ , tiempo de concentración, hr

$T_t$ , tiempo de tránsito o tiempo de viaje desde la celda que se analiza, hr

$L_{vN}$ , longitud de viaje de la celda más lejana

$L_{vn}$ , longitud de viaje de la celda que analiza

*Tiempo de concentración* se define como el tiempo que le toma a la precipitación excedente alcanzar la salida de la cuenca desde su punto hidráulicamente más remoto. Es una medida de retraso puro, sin tomar en cuenta el efecto de almacenamiento. En la literatura existen varias ecuaciones para el cálculo del tiempo de concentración  $T_c$ , la ecuación empleada por el modelo MPE es la ecuación de Kirpich:

$$T_c = 0.000325 \times \left( \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}} \right) \quad [8]$$

Donde:

$T_c$ , tiempo de concentración, hr

$L$ , longitud del cauce principal, m

$S$ , pendiente del cauce principal

El *coeficiente de atenuación por almacenamiento*  $k$  es una medida de retraso provocado por el efecto del almacenamiento natural.

Para usos prácticos:

$$k = 0.6 T_c \quad [9]$$

Donde:

$T_c$ , tiempo de concentración, hr

Aplicando el Método de Muskingum a dos intervalos de tiempo y despreciando el almacenamiento en cuña, se tiene:

$$O_2 = C_0 I_2 + C_1 I_1 + C_2 O_1 \quad [10]$$

$$C_0 = C_1 = \left( \frac{0.5\Delta t}{k + 0.5\Delta t} \right) \quad [11]$$

$$C_2 = \left( \frac{k - 0.5\Delta t}{k + 0.5\Delta t} \right) \quad [12]$$

$$C_0 + C_1 + C_2 = 1 \quad [13]$$

Donde:

$I$ , caudal de entrada en ese tramo

$O$ , caudal de salida de ese tramo

$k$ , coeficiente de almacenamiento, hr

## CONTENIDOS DEL PROGRAMA MPE

En la pantalla principal del programa están contenidos los menús de **Archivo**, **Información**, **Precipitación**, **Escurrimiento** y **Ayuda**.

El menú **Información** contiene la información de la tormenta, necesaria en el cálculo del hidrograma: fecha y hora (inicial – final), intervalo de tiempo  $\Delta T$  del análisis, el archivo con los datos de lluvias y el archivo con los datos hidrológicos de la cuenca para cada celda.

X	Y	T_20:00	T_20:15	T_20:30
484266	2163564	0	0	0
482512	2158032	0.036	0.036	0.036
487757	2156184	0.062	0.062	0.312
491255	2156182	0.056	0.056	0.375
489505	2154339	0.066	0.298	0.466
480762	2156190	0.066	0.066	0.066
479013	2156192	0.049	0.081	0.081
482509	2154344	0.089	0.089	0.089
477257	2150661	0.257	0.257	0.257

**Figura 3.-** Archivo de datos de lluvia, contiene las coordenadas en UTM así como los valores de lluvia de cada estación en cada uno de los intervalos  $\Delta T$ .

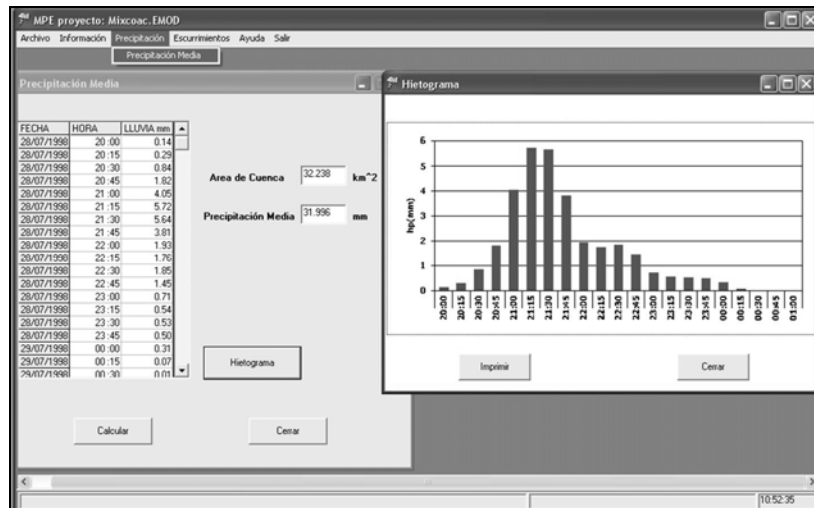
Shg_x	Shg_y	Mod_area	Flowlength	Cn
465	2131	0.00065	15.7845527	69
465	2131	0.038856	15.4421475	69
465	2132	0.501748	14.7862979	68
465	2133	0.36504	14.0270791	68
465	2134	0.049028	12.9914834	68
466	2129	0.00389	17.2991953	69
466	2130	0.734759	16.6945879	86
466	2131	0.972878	15.7845527	68
466	2132	1	14.4901396	86
466	2133	1	13.4011396	86

**Figura 4.-** Archivo de Celdas, contiene las coordenadas en SHG (Standard Hydrologic Grid), área, longitud de viaje y el número de curva asignado a cada celda.

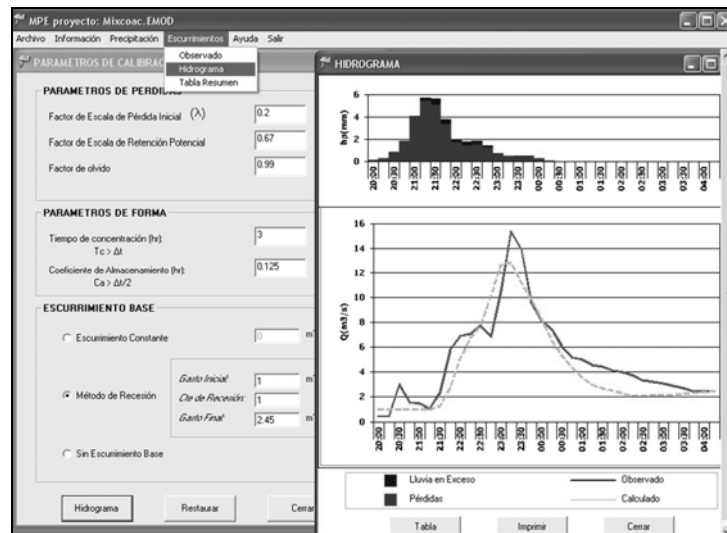
En el menú de **Precipitación** se encuentra la opción para obtener la precipitación media de la cuenca y el Hietograma. Figura 5.

El menú de **Escurrimientos**, contiene la información del escurrimiento medido, el hidrograma calculado y la tabla resumen de resultados. Figura 6.

Para cada cuenca en particular será necesario calibrar los parámetros  $Ia$ ,  $S$  y  $fx$  (llamados parámetros de pérdidas) y los parámetros  $Tc$ ,  $k$  (llamados parámetros de forma), comparando los resultados obtenidos de la simulación con datos observados.



**Figura 5.-** Ventana de Precipitación Media e Hietograma



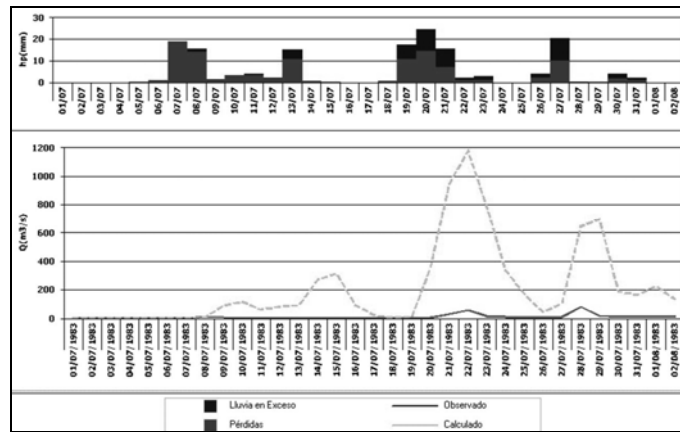
**Figura 6.-** Parámetros de Calibración e Hidrograma

## APLICACIONES

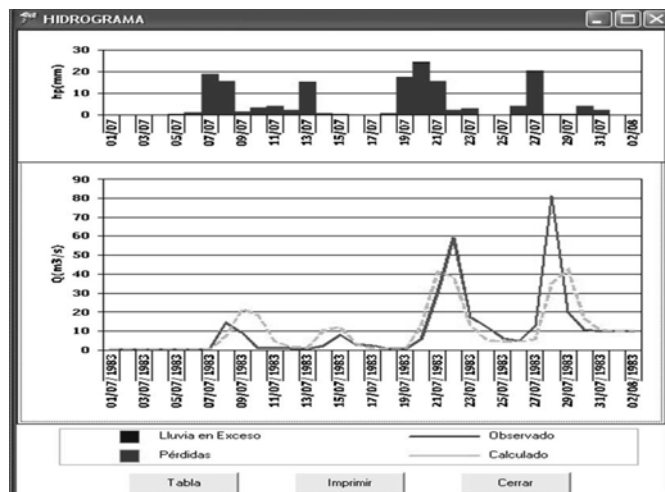
Se han modelado algunas cuencas como la cuenca del río Mixcoac ubicada en la Ciudad de México, la cuenca del río Sonora y las cuencas del Balsas que se encuentran entre las presas Caracol e Infiernillo. Actualmente se esta modelando la cuenca Peñitas, ubicada en el estado de Chiapas y las cuencas Bifurcación y Ríos de la sierra ubicadas en los estados de Chiapas y Tabasco. Estas cuencas se seguirán calibrando con más tormentas para obtener los parámetros que permitan representar de forma satisfactoria la relación entre la lluvia y el escurrimiento. Para mostrar la importancia del factor de olvido, se resumen enseguida los resultados obtenidos para la cuenca del río Sonora

Para la cuenca del río Sonora era necesario realizar la modelación para un periodo de un mes con un incremento de tiempo ( $\Delta T$ ) de 24hrs. Al realizar el cálculo con el programa HEC-HMS, se sobreestimaba el escurrimiento debido a que durante ese intervalo de análisis se habían presentado varias lluvias y no se consideraban las pérdidas por secado de la cuenca, por lo que la cuenca se consideraba saturada y escurría todo lo que llovía. Realizando la modelación en el programa MPE se logró reproducir satisfactoriamente el escurrimiento agregando el factor de olvido al cálculo.





**Figura 7.-** Hidrograma de pronóstico del río Sonora sin factor de olvido. Línea continúa el observado, línea puntada el calculado.



**Figura 8.-** Hidrograma de pronóstico del río Sonora con factor de olvido. Línea continúa el observado, línea puntada el calculado.

## CONCLUSIONES

En la actualidad existen muchos modelos computacionales de cuencas, como lo son: el *HEC-HMS* el *TR-20*, el *SSARR*, el *SWM*, el *TOPMODEL* y el *SHE*. Estos programas no siempre se ajustan a la información disponible en nuestro país y otras veces no representaban satisfactoriamente la relación lluvia-escorrentía por omitir algunos procesos físicos como lo son las pérdidas por secado de la cuenca que se presentan de una tormenta a otra.

Era necesario desarrollar un programa propio en el que se aplique la experiencia que se tiene en el del Instituto Ingeniería de la UNAM, para obtener un programa que se adapta a la información disponible en México y que arroje mejores resultados.

El programa MPE es una herramienta útil y sencilla para la modelación distribuida del proceso lluvia-escorrentía. El programa es de uso general y se puede aplicar para cualquier tamaño de cuenca.

Con el uso del factor de olvido se pudo modelar satisfactoriamente los escurrimientos producidos por una secuencia de tormentas.

Comparado con el programa HEC-HMS el modelo MPE es más sencillo de utilizar.

Se pretende seguir calibrando los parámetros del modelo en un mayor número de cuencas para obtener experiencias que permitan representar de forma satisfactoria la relación entre la lluvia y el escurrimiento.

## REFERENCIAS

**Chow, V. T.** (1994). “Hidrología Aplicada”. *McGrawHill*.

**Domínguez. M. R., Gracia J. S.** (1981). “Manual de Diseño de Obras Civiles, Hidrotecnia, A.1.4 Pérdidas”, *CFE*.

**Domínguez. M. R., Esquivel G. G., Baldemar M. A., Mendoza R. A., Arganis J. M. L.** (2008). “Manual del Modelo Pronóstico de Escurrimiento”, *Series del Instituto de Ingeniería, UNAM*.

**Engeln M.G.** (1996). “Numerical Algorithms With C”. *Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York*.

**Méndez A. B.** (2005). “Aplicaciones hidrológicas de los radares Meteorológicos”. *Tesis Doctoral. División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, UNAM*.

**USACE.** (2001). “Hydrologic Engineering Center, Hydrologic Modeling System HEC-HMS”, *Technical Reference Manual*.

**USACE,** (2003). “Hydrologic Engineering Center, Hydrologic Modeling System HEC-GeoHMS”, *User’s Manual*.