

# Actualización de los modelos lluvia-escorrimento de parámetros distribuidos para las cuencas Chicoasén y Peñitas en el sureste mexicano.

Becerril Olivares Mauricio <sup>a</sup>, Labrada Montalvo Patricia <sup>b</sup>, Domínguez Mora Ramón <sup>c</sup>, Carrizosa Elizondo Eliseo <sup>d</sup> y Esquivel Garduño Gabriela <sup>E</sup>.

Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Av. Universidad 3000, C.U., Ciudad de México, C.P. 04510, México.  
PLabradaM@iingen.unam.mx, MBecerrilO@iingen.unam.mx, RDomínguezM@iingen.unam.mx, ECarrizosaE@iingen.unam.mx, GEsquivelG@iingen.unam.mx.

Línea temática B | Hidrología, usos y gestión del agua.

---

## RESUMEN

El río Grijalva es el segundo más caudaloso de México; sobre el cauce de este se encuentra el sistema de presas hidroeléctricas del río Grijalva, el cual está conformado por las presas Belisario Domínguez (Angostura), Manuel Moreno Torres (Chicoasén), Netzahualcóyotl (Malpaso) y Ángel Albino Corzo (Peñitas). Su aportación media anual hasta el sitio de la presa Ángel Albino Corzo "Peñitas" es de 22 840 Mm<sup>3</sup>. Este sistema de presas genera alrededor del 25% del total de la energía hidroeléctrica de México y además, tiene como función el actuar como regulador de los volúmenes provenientes de las avenidas extraordinarias que se generan en los estados de Chiapas y Tabasco. Las presas "Chicoasén" y "Peñitas", están ubicadas en el estado de Chiapas y Tabasco, respectivamente, en el sureste mexicano.

---

## INTRODUCCION

En los meses de octubre y noviembre de 2007, se presentaron lluvias extraordinarias que alcanzaron los 1000 mm. durante 3 días, lo que provocó que la presa Peñitas desfogará, así como un deslizamiento de un talud sobre el cauce del río Grijalva entre las presas Malpaso y Peñitas, ocasionando una obstrucción total sobre el cauce del río y por lo tanto un cambio en la morfología de la cuenca; aunado a esto, los recientes cambios como el crecimiento de la población, la disminución de la cobertura vegetal, cambios en los usos de suelo y eventos meteorológicos extraordinarios, hicieron necesaria la actualización del modelo lluvia-escorrimento para las cuencas de la presas "Chicoasén" y "Peñitas"; esta actualización, permite un mejor pronóstico de los volúmenes provenientes de avenidas extraordinarias que permitirán tomar medidas de seguridad tanto en la operación de dicha presa, como para la protección de la población.

El objetivo de este trabajo fue la determinación de los hidrogramas de escurrimento a partir de datos de precipitación calibrando los parámetros de las cuencas Chicoasén y Peñitas, mediante un modelo lluvia-escorrimento de parámetros distribuidos, que permite pronosticar los volúmenes de las avenidas hacia la presas Chicoasén y Peñitas. Los modelos distribuidos consideran la variabilidad espacial de las propiedades físicas de la cuenca y de la precipitación, al dividir la cuenca en micro cuencas o celdas simulando los procesos físicos que ocurren en cada elemento, tales como la infiltración, el escurrimento sobre la superficie del terreno, el flujo de corrientes, etc. Con ayuda de un Sistema de Información Geográfica se divide la cuenca asignándole a cada una de ellas parámetros y factores uniformes (uso de suelo, tipo de suelo, vegetación, pendiente, etc.).

Para ello se utilizó el Modelo de Pronóstico de Escurrimento (MPE) desarrollado en el Instituto de Ingeniería en México. El MPE trabaja con la información de las lluvias presentadas en las estaciones pluviográficas instaladas en la cuenca en estudio así como con los parámetros fisiográficos de la cuenca. El modelo 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.

Para la actualización del modelo lluvia-escorrentamiento, fue necesario calibrar los parámetros de pérdidas y forma en el MPE. Los parámetros de pérdidas son los que intervienen en la producción del escurrimiento: factor de escala de pérdida inicial (I), factor de escala de retención potencial (fs) y el factor de olvido (fx). Los parámetros de forma son los que intervienen en el traslado del escurrimiento y además le dan forma al hidrograma: tiempo de concentración (Tc) y coeficiente de almacenamiento (K).

Para actualizar los parámetros del modelo se utilizaron las tormentas más representativas del año 2009 al 2015.

## METODOLOGÍA

El programa computacional MPE, desarrollado en lenguaje de programación Visual Basic, fue elaborado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM (Dominguez et al. 2008) para obtener el hidrograma de escurrimiento de una cuenca con un modelo de parámetros distribuidos que considere de manera sencilla las pérdidas por evapotranspiración que se presentan durante el intervalo de tiempo de una tormenta a otra y que se ajuste a la información disponible en nuestro país para su análisis.

Para el funcionamiento del programa, el MPE necesita archivos de entrada desarrollados en un SIG, específicamente el ArcView 3.2, que se utiliza para obtener los parámetros hidrológicos de la cuenca en forma de malla en conjunto con la extensión de modelación hidrológica geoespacial (HEC-GeoHMS), desarrollada por el Hydrologic Engineering Center para el US Army Corps of Engineers.

En el presente estudio se ha empleado el software ArcView con las extensiones: Hec-GeoHMS, Spatial Analyst, 3D Analyst, Geoprocessing y Xtools, con el cual partir de un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) es capaz, con la ayuda de la extensión Hec-Geo HMS, de obtener la división de la cuenca dándole como dato el punto de cierre de la misma. Además, permite dividir la cuenca en tantas subcuencas como el usuario determine, y asignarle a cada una valores de parámetros hidrológicos como el CN.

La información para el modelo distribuido para la transformación de lluvia en escurrimiento, fue obtenida del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE), el cual realiza el monitoreo de estaciones hidrométricas y climatológicas en diferentes cuencas hidrológicas de México vía satélite.

El IIE maneja 13 estaciones dentro de la cuenca Chicoasén. La información de cada una de ellas fue obtenida desde su página de internet.

Para llevar a cabo de manera correcta este modelo, se realizó la siguiente metodología:

1. Análisis de la información disponible.
2. Selección de los eventos de gastos máximos.
3. Representación de la cuenca mediante un SIG.
4. Determinación de las áreas de influencia para cada pluviómetro.
5. Obtención de un modelo calibrado que reproduzca los eventos seleccionados mediante el MPE.

## MÉTODOS MATEMÁTICOS

El Programa MPE utiliza para la producción del escurrimiento el método del Número de Curva del SCS (Soil Conservation Service), es un método sencillo para calcular la lluvia efectiva en donde:

Pn precipitación acumulada neta en el intervalo de tiempo n, cm

Pn 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 del método de Número de Curva.

$$Pe = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S}; I_a \leq P, 0 \dots\dots\dots(1)$$

Donde:

P, precipitación total, cm

Ia, retención, (infiltración) inicial, cm

Fa, infiltración acumulada, cm

Pe, precipitación efectiva, cm

S, retención, (infiltración) potencial máxima, cm

$$S = \frac{2540 - (25.4 \times CN)}{CN} \dots\dots\dots(2)$$

Donde CN es el Número de Curva determinado a partir de uso y tipo de suelo ( $0 < CN \leq 100$ ).

La transferencia del escurrimiento se modela con el método de Clark Modificado, Méndez (2005) que 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. Para cada cuenca es necesario calibrar los parámetros Ia, S y fx (llamados parámetros de pérdidas) y los parámetros Tc y k (llamados parámetros de forma), comparando los resultados obtenidos de la simulación con datos observados.

Parámetros de pérdidas. Intervienen en la producción del escurrimiento.

Factor de Escala de pérdida Inicial ( $\lambda$ ) En el método de Número de Curva, relaciona la infiltración inicial con la infiltración potencial máxima. El valor de  $\lambda$  debe estar entre 0 y 1, para aplicaciones prácticas se recomienda iniciar la calibración con un valor  $\lambda = 0.2$ .

$$0 < \lambda < 1$$

$$Ia = \lambda S$$

Ia, infiltración inicial, cm

S, retención potencial máxima, cm

- Factor de Escala de retención Potencial ( $f_s$ ). Varía o modifica la retención potencial del suelo y, por lo tanto, el valor del número de curva.

$$S = S (f_s) \dots\dots\dots(3)$$

- menos permeable (mayor escurrimiento), al disminuir el valor de  $f_s$
- más permeable (menor escurrimiento), al aumentar el valor de  $f_s$

- Factor de Olvido ( $f_x$ ). Con este parámetro se consideran las pérdidas por evapotranspiración que se presentan durante el intervalo de tiempo de una tormenta a otra. Se recomienda cuando se quieren modelar varios días que:

$$0 < f_x \leq 1 \dots\dots\dots(4)$$

Donde:

- menos evapotranspiración (mayor escurrimiento), al aumentar el valor de  $f_x$ .
- más evapotranspiración (menos escurrimiento), al disminuir el valor de  $f_x$ .

a) Parámetros de Forma. Intervienen en el traslado del escurrimiento. Le dan la forma al hidrograma:

- Tiempo de Concentración ( $T_c$ ). Tiempo que tarda la precipitación excedente en alcanzar la salida de la cuenca desde su punto más alejado.

$$T_c > \Delta t \dots\dots\dots(5)$$

Coefficiente de Almacenamiento ( $C_a$ ). Tiempo de retraso provocado por el efecto del almacenamiento natural. Para una primera aproximación:

$$C_a = 0.6 T_c \dots\dots\dots(6)$$

$$Ca > \Delta t / 2 \dots \dots \dots (7)$$

Donde:

Ca, coeficiente de almacenamiento.

Tc, tiempo de concentración.

Δt, intervalo de tiempo para el cálculo del pronóstico.

El tiempo de concentración Tc 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 bibliografía existen varias ecuaciones para calcular el tiempo de concentración, Tc. La ecuación empleada por el modelo MPE es la ecuación de Kirpich:

$$Tc = 0.000325 \times \left( \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}} \right) \dots \dots \dots (8)$$

Donde:

Tc, tiempo de concentración (h)

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:

$$k = 0.6 Tc$$

Donde:

k, es el coeficiente de almacenamiento (h)

Tc, tiempo de concentración (h)

Al traslado del escurrimiento se le aplica el Método de Muskingum para considerar el retraso por almacenamiento.

## MODELACIÓN DISTRIBUIDA EN LA CUENCA PEÑITAS Y CHICOASEN

En el SIG se elaboraron los mapas distribuidos tanto de la cuenca Chicoasén y Peñitas, empleando un modelo digital de elevación a escala 1:50 000 y los mapas digitalizados de uso y tipo de suelo a escala 1:250 000 del INEGI. El mallado de las cuencas se realizó de 1 km por 1 km. relacionando los mapas de uso y tipo de suelo, se elaboró el mapa de número de curva para las cuencas en estudio

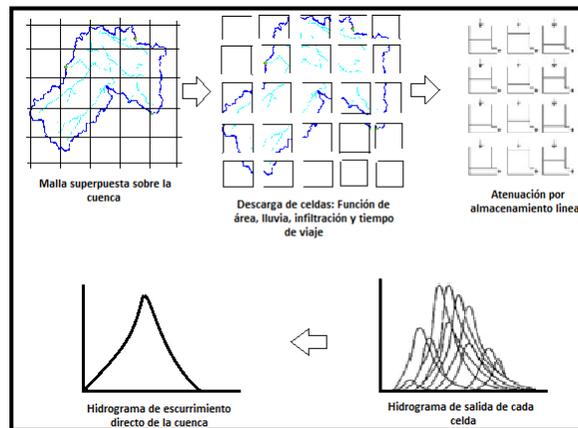


Figura 1 | Modelo distribuido de la cuenca.

## MODELO PARA PRONÓSTICO DE ESCURRIMIENTO (MPE)

Mediante un modelo de parámetros distribuidos, el programa MPE es capaz de pronosticar los escurrimientos en una cuenca. Su objetivo es modelar la relación entre precipitación y escurrimiento, con el fin de hacer una buena estimación de los escurrimientos.

El método utilizado para la producción del escurrimiento está basado en el Soil Conservation Service (SCS), con una consideración que permite contemplar el secado del suelo después de 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). El modelo obtiene la precipitación media en la cuenca, el hietograma de precipitación, la lluvia en exceso, las pérdidas y el hidrograma a la salida de la cuenca.

Para cada cuenca es necesario calibrar los parámetros  $I_a$  (infiltración inicial),  $S$  (retención potencial máxima) y  $f_x$  (factor de olvido), llamados parámetros de pérdidas y los parámetros  $T_c$  (tiempo de concentración),  $k$  (coeficiente de atenuación por almacenamiento) llamados parámetros de forma, y comparar los resultados obtenidos de la simulación con datos observados.

Para un correcto funcionamiento del MPE, se requiere la información de estaciones pluviográficas e hidrométricas instaladas en la cuenca así como los archivos con los parámetros hidrológicos en forma de malla que representa las celdas como subcuencas para la modelación distribuida, todos estos archivos en formato .txt. Los resultados obtenidos con este modelo pueden ser guardados en archivos con el mismo formato.

En la siguiente tabla se presentan las fechas seleccionadas de las lluvias más representativas que se utilizaron en el programa MPE:

**Tabla 1** | Fechas de calibración para cuenca Chicoasén.

Año	Fechas Seleccionadas
2010	20 de septiembre al 10 octubre
2011	14 septiembre al 24 octubre
2012	1 septiembre al 18 octubre
2013	1 octubre al 20 octubre
2014	14 septiembre al 29 octubre

**Tabla 2** | Fechas de calibración para cuenca Peñitas.

FECHAS DE ANÁLISIS	ESTACIONES UTILIZADAS
22 de octubre al 21 de noviembre de 2009	E Zapata, Azapac, Malpaso, Ocotepc, Rómulo Calzada, Sayula, Tzimbac
01 de septiembre al 01 octubre de 2010	(E Zapata, Azapac, Malpaso, Ocotepc, Rómulo Calzada, Sayula, Tzimbac)
11 al 24 septiembre de 2011	E Zapata, Azapac, Malpaso, Ocotepc, Peñitas, Rómulo Calzada, Sayula, Tzimbac
18 al 25 diciembre de 2012	E Zapata, Azapac, Malpaso, Ocotepc, Peñitas, Rómulo Calzada, Sayula, Túneles de Grijalva, Tzimbac
18 de octubre al 17 de noviembre 2013	E Zapata, Azapac, Malpaso, Ocotepc, Peñitas, Rómulo Calzada, Sayula, Túneles de Grijalva, Tzimbac
18 de septiembre al 21 octubre 2014	E Zapata, Azapac, Malpaso, Ocotepc, Peñitas, Rómulo Calzada, Sayula, Túneles de Grijalva, Tzimbac
14 al 23 octubre de 2015	E Zapata, Azapac, Malpaso, Ocotepc, Rómulo Calzada, Sayula, Túneles de Grijalva, Tzimbac

## RESULTADOS

Los resultados se presentan en forma gráfica y tabular; en la gráfica se muestra la lluvia en exceso, la lluvia infiltrada (pérdidas) y el hidrograma del escurrimiento medido y pronosticado.

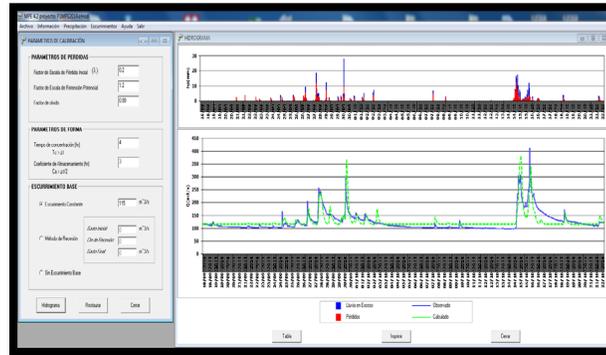


Figura 2 | Hidrograma de calibración en cuenca Peñitas.

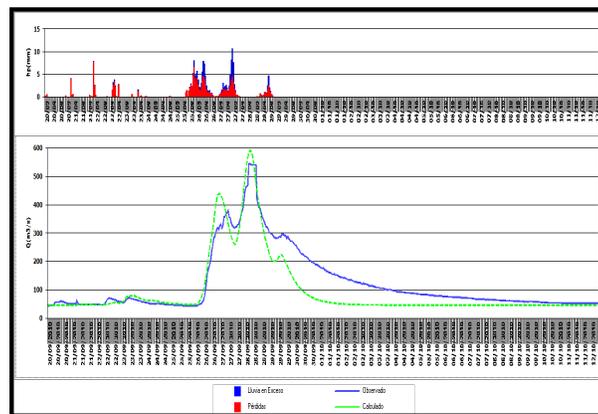


Figura 3| Hidrograma de calibración en cuenca Chicoasén.

Tabla 3 |Parámetros finales de calibración para la cuenca Chicoasén.

CHICOASÉN	Época de pocas lluvias	Época de lluvias
<b>PARÁMETROS DE PÉRDIDAS</b>		
Factor de escala de pérdida inicial ( $\lambda$ )	0.2	0.2
Factor de escala de retención potencial	1.8	1.2
Factor de olvido ( $f_x$ )	0.97	0.98
<b>PARÁMETROS DE FORMA</b>		
T <sub>c</sub> , en hrs.	28	28
K <sub>r</sub> , en hrs.	22	22

**Tabla 4** | Parámetros finales de calibración para la cuenca Peñitas (Alta y baja).

<b>PARÁMETROS DE CALIBRACIÓN FINALES CUENCA ALTA DE PEÑITAS</b>	
<b>PARAMETROS DE PERDIDAS</b>	
Factor de escala de pérdida inicial	<b>0.2</b>
Factor de escala de retención potencial	<b>1.2</b>
Factor de olvido (fx)	<b>0.98</b>
<b>PARAMETROS DE FORMA</b>	
Tc, en hrs.	<b>7</b>
K, en hrs.	<b>5</b>

<b>PARÁMETROS DE CALIBRACIÓN FINALES CUENCA BAJA DE PEÑITAS</b>	
<b>PARAMETROS DE PERDIDAS</b>	
Factor de escala de pérdida inicial	<b>0.2</b>
Factor de escala de retención potencial	<b>1.2</b>
Factor de olvido (fx)	<b>0.99</b>
<b>PARAMETROS DE FORMA</b>	
Tc, en hrs.	<b>5</b>
K, en hrs.	<b>4</b>

## CONCLUSIONES

A partir de las modelaciones previamente mostradas, se obtuvieron los parámetros de calibración del modelo Lluvia-Escorrimento para la cuenca Peñitas.; esto nos permite tener una herramienta de estimación de avenidas ante eventos meteorológicos que pueden llegar a poner en peligro a la población y a la generación de energía eléctrica.

En la cuenca Chicoasén, En la parte alta de la cuenca, se cuenta con pocas estaciones, por lo que hubo dificultad en las calibraciones. Se observa que se obtienen mejores resultados cuando las avenidas son mayores y cuando la medición de las lluvias se realiza con un mayor número de estaciones repartidas en las cuencas.

Se puede concluir que con el modelo obtenido, se comprobó que el comportamiento y las características del suelo son factores importantes para calcular la precipitación efectiva y que con el uso de parámetros distribuidos para la distribución espacial de la precipitación, obtendremos resultados más reales. Se puede decir que el MPE es realmente útil y confiable para predecir la respuesta hidrológica de una cuenca.

En la Cuenca Penitas, Debido al deslizamiento del talud en el municipio de Juan de Grijalva, ya no es posible calibrar la Cuenca Peñitas como una sola cuenca, por lo que fue necesario realizar el análisis y la calibración aguas arriba y aguas abajo del talud.

Debido al deslizamiento del talud en el municipio de Juan de Grijalva, ya no es posible calibrar la Cuenca Peñitas como una sola cuenca, por lo que fue necesario realizar el análisis y la calibración aguas arriba y aguas abajo del talud.

La calibración se realizó en las subcuencas Tzimbac con aportaciones de Azapac, y en la cuenca Sayula, los parámetros obtenidos en la primera se utilizaron en el modelo de la cuenca aguas arriba de Juan de Grijalva y los parámetros en Sayula se utilizaron en el modelo de la cuenca aguas abajo de Juan de Grijalva.

## REFERENCIAS

- Aparicio, M.F.J.,2009. Fundamentos de Hidrología. Ed. Limusa, México.  
Campos, A., D.F. (2007). Estimación y aprovechamiento del escurrimiento. México.

- Chow, V, T. (1994) Hidrología Aplicada. Mcgraw-Hill Interamericana, S. A.
- Domínguez MR, Esquivel G.G., Méndez A.B., Mendoza R.A., Arganis J.M.L., Carrizosa E.E. 2008. Manual del Modelo para pronóstico de escurrimiento, IIUNAM.
- Domínguez MR, Quaas R, Legaria G, (1978) Sistema de telemedición hidrológica para predecir avenidas, presa Chicoasén, Chiapas. IIUNAM.
- Esquivel G.G., (2000). Modelo lluvia-escurrimiento para la Cuenca del Río Mixcoac. Tesis Maestría, IIUNAM.