

Modificación en el patrón de flujo en cuencas de respuesta rápida en zonas altamente urbanizadas

(Dinámica fluvial; Hidrología, usos y gestión del agua)

*Óscar Arturo Fuentes Mariles, Faustino De Luna Cruz, Darío Alfredo Hernández Aguilar y
Juan Ansberto Cruz Gerón*

Instituto de Ingeniería, UNAM

*ofm@pumas.iingen.unam.mx; fluc@pumas.iingen.unam.mx; dhernadeza@iingen.unam.mx;
jcruzg@iingen.unam.mx*

Las características del drenaje de cuencas de respuesta rápida inmersas en zonas urbanas han sido modificadas paulatinamente al cambiar el uso de suelo. Tanto sus coeficientes de escurrimiento como sus patrones de flujo se transforman continuamente por el acelerado proceso de urbanización, ocasionando que los cauces naturales no conduzcan los gastos de diseño determinados en forma tradicional en la hidrología, ya que calles y avenidas principales, paralelas a las corrientes naturales, funcionan como ríos ante la presencia de lluvias intensas. Este cambio de patrón de flujo debe ser tomado en cuenta para proponer acciones de manejo de crecientes.

En este trabajo se muestran los análisis realizados a una cuenca urbana ubicada al norte de la Ciudad de México, en donde los ríos principales que anteriormente conducían en forma natural el total de los escurrimientos ahora conducen únicamente una parte de éstos. Mediante la aplicación de modelos matemáticos de flujo unidimensional en régimen subcrítico y supercrítico, y de flujo bidimensional, se determinan los patrones de flujo actualizados y generados por el cambio de uso de suelo y se identifican las modificaciones en el trazo de las subcuencas de la zona de estudio. El resultado del diagnóstico de la actualización del sistema de escurrimientos se utiliza para definir el tamaño óptimo de las acciones estructurales y las estrategias para el manejo adecuado de las crecientes en zonas en donde las inundaciones se presentan frecuentemente.

1. INTRODUCCIÓN

Una cuenca es el área drenada por una corriente o un sistema de corrientes con una salida en forma natural, si es endorreica, por ello las cuencas urbanas serán generalmente exorreicas. Las cuencas urbanas presentan áreas con un alto grado (o su totalidad) de urbanización, en donde sus suelos y su cobertura vegetal han sido sustituidos por superficies altamente impermeables, originando que su respuesta sea más rápida y de mayor intensidad que en condiciones naturales, pues su infiltración se reduce y la precipitación en exceso crece de forma importante.

Por otro lado, en las cuencas pequeñas la cantidad y forma del escurrimiento son altamente influenciadas por el tipo de suelo y su fisiografía, mientras que en cuencas grandes la infiltración y el almacenamiento y regulación de la red de corrientes condiciona el comportamiento de los escurrimientos en la cuenca misma.

Existen en la literatura parámetros físicos evaluables en las cuencas, que tienen influencia directa en su respuesta hidrológica, e incluso existe una cierta reciprocidad en que su régimen hidrológico contribuye a formar tales características. En este trabajo se evalúan mediante herramientas desarrolladas en el Instituto de Ingeniería de la UNAM, la nueva configuración de la red de drenaje y se valora en el modelo lluvia-escurrimiento Hidrograma Unitario Instantáneo Geomorfológico, las diferencias hidrológicas entre una red de cauces en condiciones naturales y en condiciones altamente urbanizadas. Adicionalmente se valoran los escurrimientos generados a partir del producto con el hietograma asociado a cierto periodo de retorno para ambas condiciones, naturales y urbanizadas.

2. RELACIONES LLUVIA-ESCURRIMIENTO (HUIG)

En las cuencas, los parámetros físicos fundamentales para determinar las relaciones lluvia-escurrimiento, por tener una relación causa-efecto con su respuesta hidrológica son: área (A), índice de compacidad (Ic), relación de elongación (R_e), altitud media (Em), orden de corrientes (Oc), densidad de drenaje (Dd), pendiente promedio de corriente principal (Sc), tiempo de concentración (Tc) y el coeficiente de escurrimiento en función del uso de suelo (Ce).

Los parámetros Ic , R_e , Em , Dd y Sc pueden ser útiles para establecer comparaciones cuantitativas entre cuencas, con el propósito de detectar similitudes que permitan extrapolar información hidrológica o la estimación de magnitudes características. Por otro lado, A , Tc y Ce tienen aplicación directa en cálculos hidrológicos como la precipitación en exceso y de las correspondientes avenidas de diseño.

La red de drenaje de una cuenca está integrada por una corriente principal y una serie de tributarios cuyas ramificaciones se extienden hacia las partes más altas de la cuenca. Las corrientes tributarias son las corrientes secundarias que llegan a la corriente principal.

La clasificación más utilizada actualmente es la de Horton-Strahler, la cual clasifica a las corrientes según el procedimiento siguiente:

- Los cauces de primer orden son los que no tienen tributarios.
- Cuando las corrientes de orden n se unen, se crea una corriente de orden $n+1$.
- Cuando dos corrientes de diferente orden convergen, el segmento de corriente inmediatamente aguas abajo se toma como la continuación de la corriente de mayor orden.
- El orden de la cuenca es el mismo que el de su cauce principal a la salida.

Horton (1945) fue el primero en sugerir algunas leyes empíricas que se consideran constantes de un orden a otro, para que posteriormente fueran confirmadas usando el sistema de ordenación de Strahler, y que se presentan a continuación.

Ley del número de corrientes

$$R_B = \frac{N_i}{N_{i+1}}$$

Ley de las longitudes de las corrientes

$$R_L = \frac{\bar{L}_{i+1}}{\bar{L}_i}$$

Ley de áreas de las corrientes

$$R_A = \frac{\bar{A}_{i+1}}{\bar{A}_i}$$

donde:

$$\bar{L}_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L_i$$

, longitud promedio de una corriente de orden i , en km.

$$\bar{A}_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i$$

, área promedio que contribuye al escurrimiento de una corriente de orden i , en km².

L_i , longitud de una corriente de orden i , en km.

A_i , área que contribuye al escurrimiento de una corriente de orden i , en km².

N_i , número de corrientes de orden i .

En realidad, las leyes de Horton indican una progresión geométrica de número, longitud y área de las corrientes de una cuenca y por lo tanto, gráficamente corresponden a las relaciones lineales entre el número de orden y los logaritmos del número, longitud y área de corrientes; de donde las relaciones R_B , R_L y R_A se obtienen como el antilogaritmo de la pendiente de dichas rectas. A través de los años se ha observado que para cuencas naturales tienen cierto rango de variación, para R_B de 3 a 5, para R_L de 1.5 a 3.5, y para R_A de 3 a 6.

Hidrograma Unitario Instantáneo Geomorfológico

Este método relaciona la respuesta de la cuenca con las características fisiográficas, geomorfológicas de la misma a través de las leyes de Horton y de un análisis probabilístico.

Con esta idea, Rodríguez-Iturbe y Valdés (1979) introdujeron el concepto de hidrograma unitario instantáneo geomorfológico (HUIG), que llevó a la renovación en la investigación en geomorfología. El análisis se enfocó en el viaje de una gota de agua a través de la cuenca. La gota de agua viaja a través de la cuenca haciendo transiciones de corrientes de menor a mayor orden. Una transición se define como un cambio de estado, donde el estado i es el orden de la corriente, donde la gota está viajando.

Con estas condiciones, Gupta (1980) demostró que el HUIG es igual a la función de densidad de probabilidad del tiempo de viaje T_B a la salida de la cuenca de una gota de agua que cae en ésta aleatoriamente con distribución espacial uniforme y está dada por:

$$P(T_B \leq t) = \sum_{S_i \in S} P(T_{S_i} \leq t) P(S_i)$$

donde:

T_B , tiempo de viaje a la salida de la cuenca

T_{S_i} , tiempo de viaje en una trayectoria particular S_i

$P(S_i)$, probabilidad de que una gota tome una trayectoria S_i

S , conjunto de las trayectorias posibles que una gota puede tomar después de caer en la cuenca.

El tiempo de viaje T_{S_i} de una trayectoria en particular, es igual a la suma de los tiempos de viaje de los elementos de esa trayectoria.

Por lo tanto, la función de densidad de probabilidad del tiempo de viaje total de una trayectoria T_{S_i} , está dada por la convolución de las funciones de densidad de cada tramo de la trayectoria, esto es:

$$f_{T_{S_i}}(t) = f_{T_{r_1}}(t) * f_{T_{r_2}}(t) * \dots * f_{T_{r_n}}(t) * f_{T_{r_{n+1}}}(t)$$

Así, para una cuenca de orden tres, la función de distribución de probabilidad de los tiempos de viaje es:

$$P(T_B \leq t) = P(T_{S_1} \leq t)P(S_1) + P(T_{S_2} \leq t)P(S_2) + P(T_{S_3} \leq t)P(S_3)$$

Donde la probabilidad de los tiempos de viaje de cada una de las trayectorias se obtiene realizando sus respectivas convoluciones.

Rodríguez-Iturbe y Valdés (1979) consideran que los tiempos de viaje de una gota en una corriente de orden ω obedecen a una función de densidad de tipo exponencial, dada por:

$$f_{T_{r\omega}}(t) = K_{\omega} e^{(-K_{\omega}t)}$$

donde:

$$\frac{1}{K_{\omega}}, \text{ tiempo promedio de escurrimiento.}$$

$$K_{\omega} = \frac{V}{L_{\omega}}, \quad K_1 = \frac{V}{L_1}, \quad K_2 = \frac{K_1}{R_L}, \quad K_3 = \frac{K_1}{R_L^2}$$

V , velocidad de pico para cualquier evento dentro de la cuenca, en m/s.

Este método se considera adecuado para cuencas cuyo orden de red de drenaje es representativo de la misma, esto se logra para un orden igual o mayor a tres.

3. MODELO MATEMÁTICO DDE FLUJO BIDIMENSIONAL (BIDIM-UNAM)

Para determinar las áreas de inundación, en este trabajo se presenta utiliza el modelo numérico BIDIM-UNAM, el cual se ha desarrollado en el Instituto de Ingeniería de la UNAM.

El carácter dinámico de las inundaciones hace necesario emplear modelos matemáticos que, por lo menos, incluyan ecuaciones de flujo en dos dimensiones (Fuentes, *et al* 1997), a través de las ecuaciones de conservación de cantidad de movimiento (ecuaciones 1 y 2) y ecuación de continuidad (ecuación 3).

$$\frac{1}{g} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{n^2 |u| u}{h^{4/3}} = -\frac{\partial h}{\partial x} - \frac{\partial z}{\partial x} \quad \dots(1)$$

$$\frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{n^2 |v| v}{h^{4/3}} = -\frac{\partial h}{\partial y} - \frac{\partial z}{\partial y} \quad \dots(2)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} u h + \frac{\partial}{\partial y} v h = 0 \quad \dots(3)$$

donde:

$$S_{fx} = \frac{n^2 |u| u}{h^{4/3}} \quad \dots(4)$$

$$S_{fy} = \frac{n^2 |v| v}{h^{4/3}} \quad \dots(5)$$

S_{fx} y S_{fy} son la pendiente de fricción en las direcciones x y y, adimensionales.

g , aceleración de la gravedad, en m/s^2 .

u , v componentes de la velocidad en las direcciones x y y, adimensionales.

h , nivel de la superficie libre del agua con respecto al nivel del terreno, en m.

n , coeficiente de rugosidad según la fórmula de Manning, en $s/m^{1/3}$.

x , y y z direcciones del sistemas de ejes cartesiano derecho.

t , tiempo, en s.

Para calcular el flujo en una planicie de inundación se debe resolver el sistema de ecuaciones anterior considerando condiciones iniciales y de frontera; dado que no existe un método analítico para encontrar la solución, se ha utilizado un método numérico de diferencias finitas.

Sea el área de inundación en proyección horizontal dividida en celdas con longitud a lo largo del eje x (Δx) y del eje y (Δy) (Figura 1).

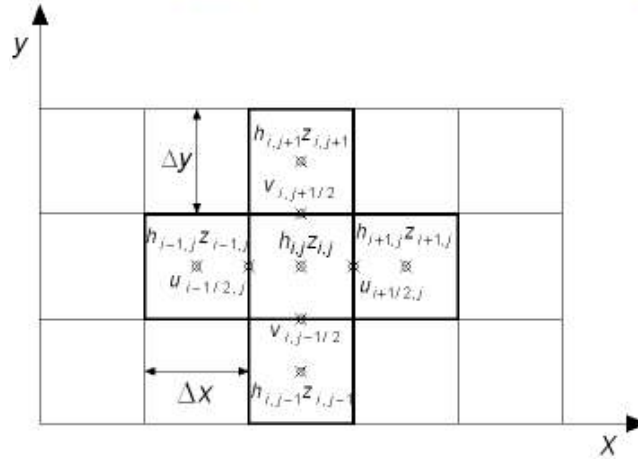


Figura 1. Arreglo de celdas considerado en el método numérico para el área de inundación

4. CASO DE ESTUDIO. CUENCA DEL RÍO CUAUTEPEC, CIUDAD DE MÉXICO.

La cuenca del río Cuauhtepc tiene una superficie de aproximadamente 20.75 km² y se ubica al norte de la ciudad de México, limitando con la sierra de Guadalupe al interior del Valle de México. Su cauce principal tiene una longitud de cerca de 8 km y su inicio parte de la cota 2650 m hasta la 2250 m. En la Figura 2.A se presenta la red de drenaje en condiciones naturales de la cuenca de estudio. Dos las características muy importantes de la cuenca, en las condiciones actuales, es la fuerte pendiente del terreno y el alto grado de urbanización, ya que ésta última, cubre en alrededor del 80% del área de la misma (Figura 2.B), por lo que gran parte de la precipitación no se infiltra y escurre sobre la superficie; además que a pocos minutos de inician las lluvias se producen fuertes flujos de agua (avenidas súbitas) sobre las calles y los cauces de los ríos mencionados por lo que se le considera de respuesta rápida.

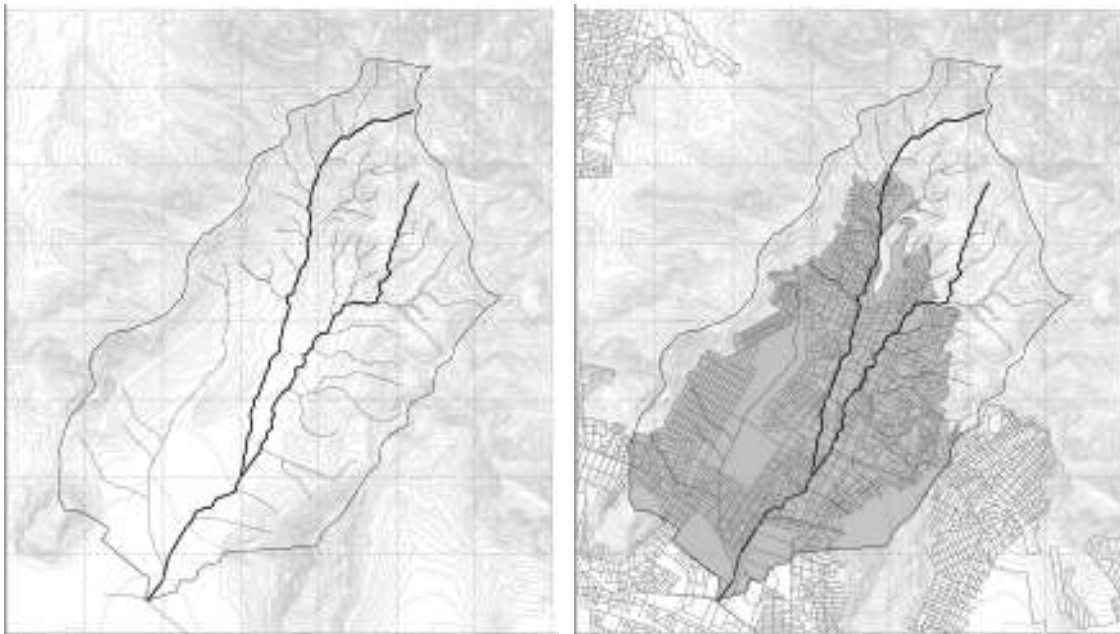


Figura 2. A. Fisiografía de la cuenca en condiciones naturales con su red de drenaje. B. Condiciones urbanizada al año 2010 de la cuenca de estudio

La actual traza urbana y su correspondiente red de drenaje urbano en la cuenca ha modificado notablemente las áreas tributarias naturales de los escurrimientos que confluyen a los ríos cauces Maximalaco y Cuauhtepc, ambos consideradas las principales corrientes de la cuenca.

Utilizando como fuente de información la topografía *Lidar*, se generó una malla con celdas de 5 m x 5 m en las condiciones actuales, en donde es posible incorporar la traza urbana, con lo cual se aplicó el modelo BIDIM-UNAM para diferentes escenarios. Algunos de estos resultados se presentan en la siguiente secuencia de imágenes, cuya finalidad es estimar un nuevo patrón de flujos en la cuenca a partir de los resultados obtenidos con la topografía actualizada.

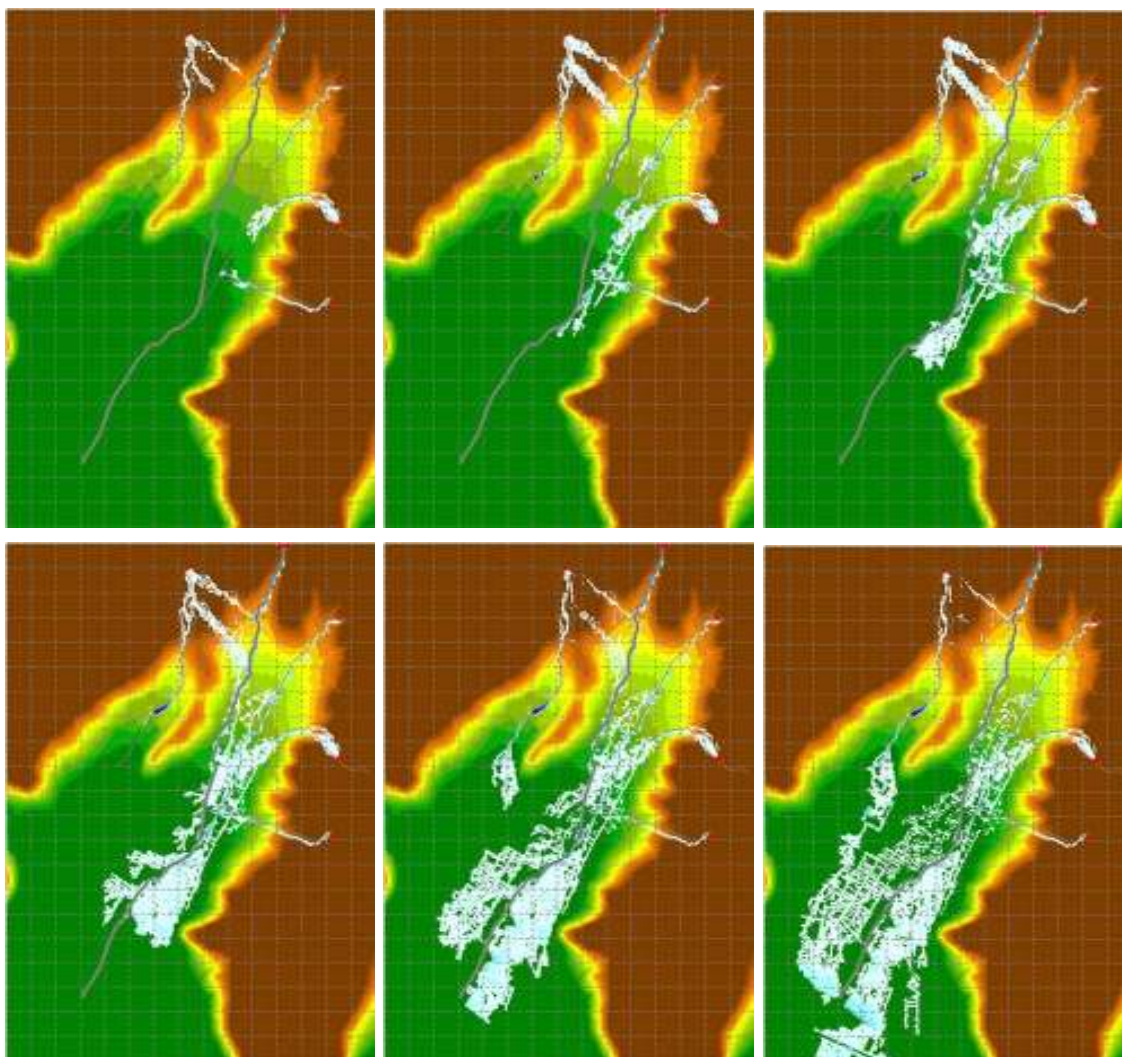


Figura 3. Resultados gráficos del modelo BIDIM-UNAM, en la cuenca de estudio en la condición urbanizada, para diferentes tiempos de simulación, en orden progresivo.

De los resultados anteriores, se puede observar que a partir de los resultados gráficos de flujo bidimensional en las condiciones actuales, es posible determinar un patrón de flujo que puede compararse espacialmente con la red de drenaje natural de la cuenca, tal como se presenta en la Figura 4. En dicha figura se presenta la red de drenaje natural en color oscuro y en forma intermitente la red de drenaje modificada por las condiciones urbanas actuales. Puede observarse en este caso, que aproximadamente a partir de la cota 2400 m hacia aguas arriba, ya no existen modificaciones perceptibles en la red de drenaje. Sin embargo hacia aguas abajo, los cambios son notorios al grado de que algunas calles y avenidas funcionan como corrientes de drenaje pluvial, observándose además que en condiciones naturales se contaba con tres corrientes principales, y en la actualidad son cuatro las corrientes principales que se observa, ya que una avenida cumple con dicha función de cauce. En las Figuras 5 y 6, se presentan los trazos de las subcuencas de orden 1 y 2 para las condiciones: natural y urbanizada, respectivamente. En ellas pueden observarse cambios importantes que se valoran cuantitativamente en el número de subcuencas y en sus superficies correspondientes. Posteriormente, en la Figura 7 se observa que las subcuencas de orden 3 si presentan un cambio más drástico, debido a la presencia de un nuevo cauce "artificial", el cual se ubica sobre una avenida de la zona. Finalmente, las cuencas son de orden 4 y presentan las mismas superficies y se presentan en la Figura 8.



Figura 4. Redes de drenaje en condición natural (continuo) y condición urbanizada (intermitente).

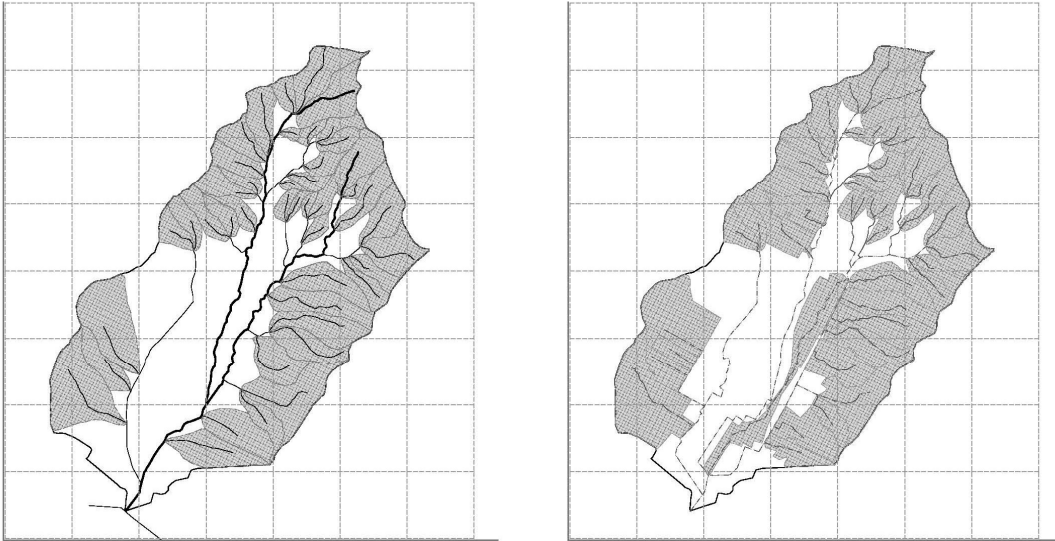


Figura 5. Subcuencas de orden 1. A. Condición natural B. Condición urbanizada

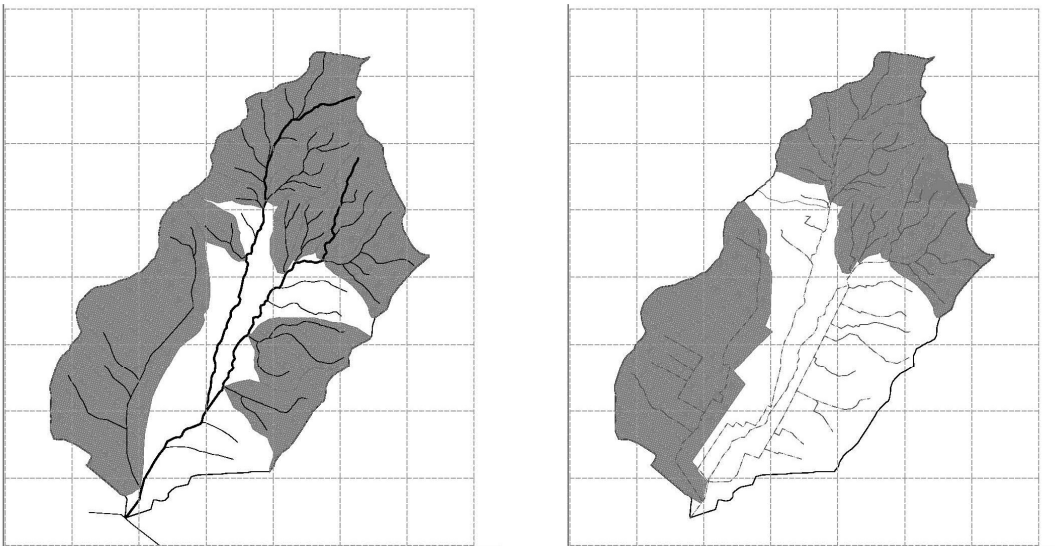


Figura 6. Subcuencas de orden 2. A. Condición natural B. Condición urbanizada

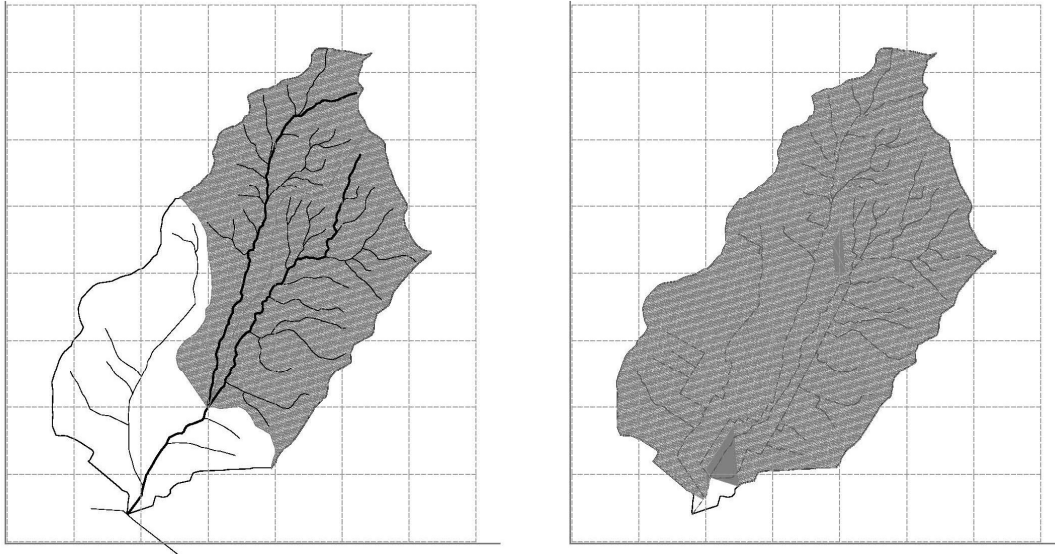


Figura 7. Subcuencas de orden 3. A. Condición natural B. Condición urbanizada

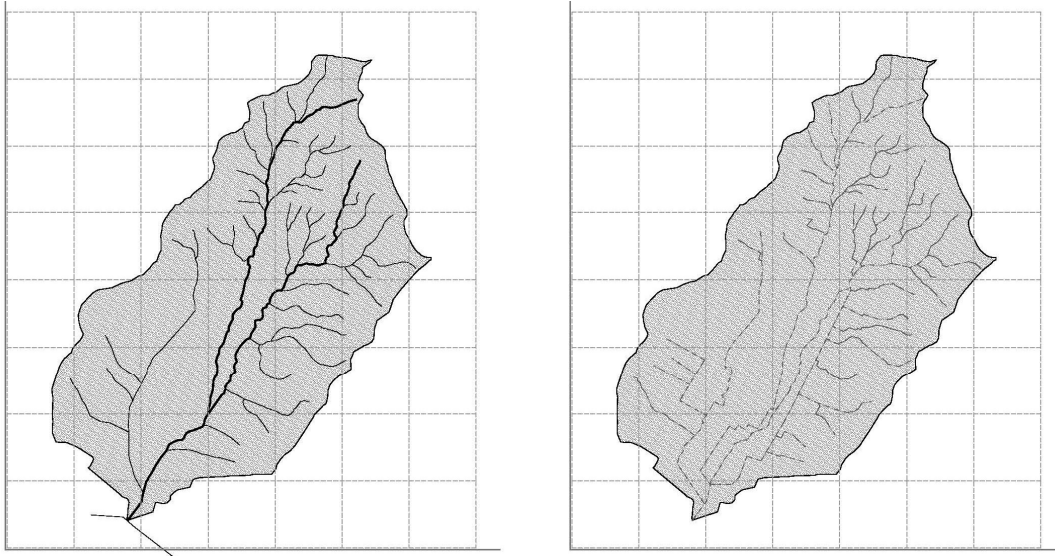


Figura 8. Subcuenca de orden 4. A. Condición natural B. Condición urbanizada

Se determinaron los parámetros geomorfológicos de área de cada subcuenca en sus diferentes órdenes (1 a 4), así como longitudes de cauce de las mismas subcuencas, en las dos condiciones de estudio, con la finalidad de determinar el HUIG para el estado natural y el estado urbanizado, resultando en forma de resumen, la tabla que se presenta a continuación.

Tabla 1. Parámetros geomorfológicos. Condiciones naturales y urbanizadas.

CONDICIÓN		orden1	orden 2	orden 3	orden 4
NATURAL	<i>cantidad</i>	44	11	2	1
URBANA	<i>cantidad</i>	44	7	2	1
NATURAL	<i>área total, km²</i>	12.19	14.75	13.17	20.75
URBANA	<i>área total, km²</i>	13.32	11.74	20.58	7.96
NATURAL	<i>longitud total, km</i>	28.8	17.93	10.86	20.75
URBANA	<i>longitud total, km</i>	30.28	14.17	10.29	7.96
NATURAL	RB	3.69			
URBANA	RB	3.41			
NATURAL	RA	4.28			
URBANA	RA	4.12			
NATURAL	RL	2.38			
URBANA	RL	2.28			

De los resultados presentados en la tabla 1, se observan diferencias en las relaciones R_A , R_B y R_L , con las que se determina el HUIG, según las leyes de Horton y los conceptos descritos en el capítulo 1 del presente trabajo. En la figura 9 se presentan los HUIG resultantes para las dos condiciones.

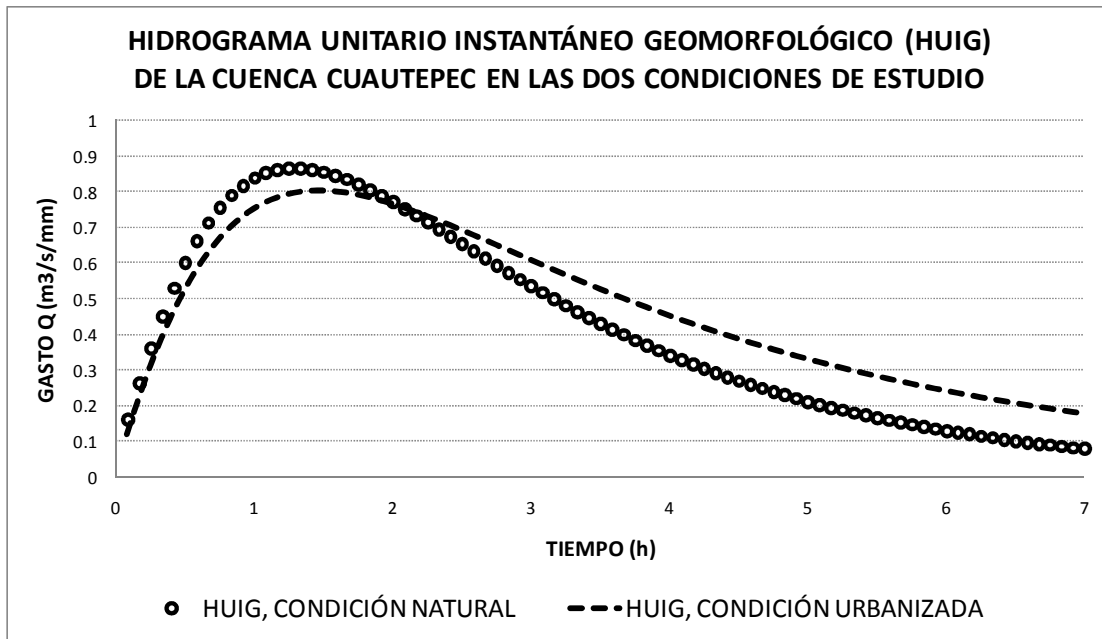


Figura 9. Representaciones gráficas de los HUIG en la cuenca para las dos condiciones de estudio

Dados que las relaciones R_A , R_B y R_L arrojaron resultados diferentes, dado que las condiciones de las redes de drenaje se modificaron como se presentó en las figuras 5 a 8, los HUIG obtenidos describen lo siguiente: los volúmenes bajo la curva son los mismos, pero su forma es ligeramente diferente, el pico de la condición natural se presenta un poco antes, ya que el recorrido de los escurrimientos en las condiciones actuales es ligeramente más sinuoso porque en dos de sus cauces principales el trazo es por las avenidas y por consecuencia la longitud es mayor. Además, la "suavización" de la caída del hidrograma igualmente puede inferirse que es debido a la regulación del agua en las mismas vialidades, ya que el tránsito en las condiciones naturales se realiza únicamente en las corrientes principales, por lo que es más rápido su conducción.

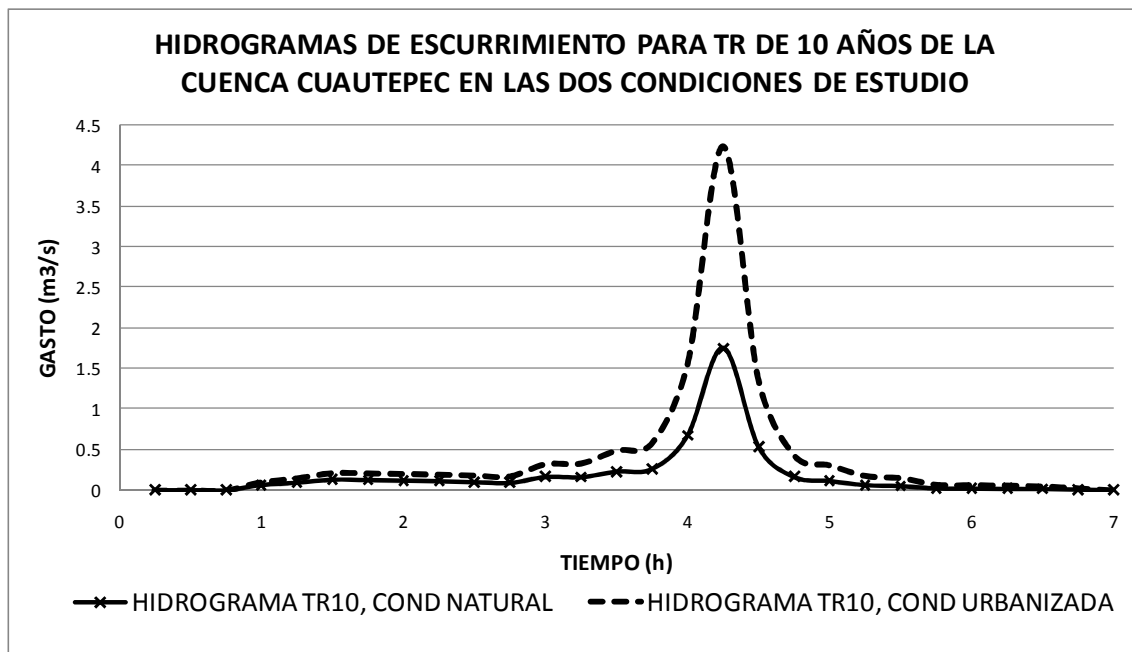


Figura 10. Hidrogramas de escurrimiento directo para las dos condiciones de estudio.

Una vez conocidos el hietograma de una tormenta de diseño, en este caso, asociado a un periodo de retorno (Tr) de 10 años, y el hidrograma unitario (HUIG) se han calculado los hidrogramas de escurrimiento directo utilizando el concepto del hidrograma unitario y la ecuación de convolución. En la Figura 10 se presentan los hidrogramas de escurrimiento directo de la zona de estudio para las dos condiciones. Cabe mencionar que los valores de C_e fueron determinados en función de las tablas que propone Chow asociados al Tr antes descrito y para sus diferentes usos de suelo, menor en la condición natural y mayor en la condición urbanizada. Se observa que el gasto máximo de salida de la cuenca se incrementa de $1.7 \text{ m}^3/\text{s}$ a $4.1 \text{ m}^3/\text{s}$, prácticamente se triplica su valor en este caso de estudio.

5. CONCLUSIONES

Con el modelo matemático de flujo bidimensional y las adecuadas fuentes de información topográfica, como es la información tipo *Lidar*, se pueden estimar los nuevos trazos de las redes de drenaje superficial en cuencas altamente urbanizadas y de respuesta rápida.

El cambio del patrón de una red de drenaje superficial en una cuenca se puede valorar en forma cuantitativa a partir de la estimación del modelo hidrológico de lluvia-escurrimiento HUIG, ya que este modelo evalúa las relaciones de bifurcación, de área y de longitud de las diferentes subcuencas desde orden 1 hasta el máximo orden. Los HUIG resultantes podrán interpretarse en función de las condiciones urbanizadas de la cuenca en relación a las condiciones naturales.

Este análisis podrá utilizarse con fines prospectivos en el cambio de la morfología de las cuencas en donde la morfología urbana tienda a asimilar la zona de estudio, con lo cual se pueden tomar decisiones adecuadas a condiciones futuras.

BIBLIOGRAFÍA

Campos, D. ESTIMACIÓN Y APROVECHAMIENTO DEL ESCURRIMIENTO. CAMPOS. 2007.

Chow, V. APPLIED HYDROLOGY. 1988.

Fennema, R.J., Chaudhry M.H.(1986). EXPLICIT NUMERICAL SCHEMES FOR UNSTEADY FREE-SURFACE FLOWS WITH SHOCKS. WATER RESOURCES RESEARCH, Vol.22 No.13 pages 1923-1939. December.

Fuentes, O. Et al. RESTAURACIÓN DEL RÍO MAXIMALALCO Y CUAUTEPEC EN LA DELEGACIÓN GUSTAVO A. MADERO, CIUDAD DE MÉXICO. ESTUDIO HIDRÁULICO DE LOS RÍOS. UNAM. 2010.

Mays, L. WATER RESOURCES ENGINEERING. Wiley. 2005.