

## ANÁLISIS DEL IMPACTO DE EVENTOS HIDROLÓGICOS EXTRAORDINARIOS MEDIANTE MODELIZACIÓN HIDROLÓGICA: CASO CULIACÁN SINALOA.

Mario Martín SANZ-MUÑOZ<sup>a</sup>, Luis Carlos BRAVO-PEÑA<sup>b</sup>, Juan Martín AGUILAR-VILLEGAS<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Estudiante de la Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio, Universidad Autónoma de Sinaloa, Blvd. De las Américas y Av. Universitarios S/N, Ciudad Universitaria, Culiacán, Sinaloa, México.

<sup>b</sup> Profesor Investigador de Tiempo Completo de la Licenciatura en Geoinformática. Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (UACJ). Cd. Cuauhtémoc Chihuahua.

<sup>c</sup> Profesor Investigador de Tiempo Completo de la Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio, Universidad Autónoma de Sinaloa, Blvd. De las Américas y Av. Universitarios S/N, Ciudad Universitaria, Culiacán, Sinaloa, México.

### RESUMEN

La modelización hidrológica permite identificar áreas de riesgo a inundación. La cartografía de estas áreas es muy importante para diseñar medidas de prevención, en particular en zonas que se ven sujetas a huracanes o eventos climatológicos extraordinarios. El objetivo del presente trabajo, fue la modelización de escenarios de escurrimiento en la Ciudad de Culiacán Sinaloa, con el fin de detectar zonas propensas a inundación, provocadas por precipitaciones máximas. Para la modelización se calculó el gasto máximo de una cuenca con base en el método de la formula racional, considerando las precipitaciones máximas históricas. Posteriormente con este gasto se alimentó un modelo de simulación de flujo a fin de identificar, mediante el uso de variables espacialmente distribuidas (Un Modelo Digital del Terreno y un mapa de uso del suelo), las áreas más vulnerables. Se modelizaron dos escenarios, y las áreas inundables modeladas se cotejaron con los registros hemerográficos históricos disponibles, encontrándose buena correspondencia. Se discuten las ventajas de la modelización hidrológica para la gestión de riesgos urbanos.

**Palabras clave:** Modelización hidrológica, Precipitaciones máximas, Formula racional, Modelo Digital de Terreno (MDT).

### ABSTRACT

Hydrologic modeling is used to identify risk floodplain areas. Cartography of those areas is important for design preventive regulations, particularly on areas exposed to hurricane or extraordinary weather events. The aim of this work was modeling runoff scenarios in Culiacán, Sinaloa, in order to identify vulnerable floodplain areas, caused by maximum precipitation. For modeling, it was calculated the maximum flow on the watershed, using rational method, considering the maximum historical rainfall. Then, using the basin flow was modeling a stream simulation to identify the most vulnerable areas, using spatially distributed variables (A Digital Elevation Model and a land use map). Were modeled two scenarios, and the floodplain areas were compared with available historical-hemerographic information, obtaining good correspondence. Advantages from hydrologic modeling for urban risk purposes are discussed.

**Keywords:** Hydrologic modeling, Maximum rainfall, Rational method, Digital Elevation Model (DEM).

## 1. Introducción

Las modificaciones no reguladas al uso del suelo, o los canales de los escurrimientos, generan impactos importantes en las partes bajas de las cuencas de drenaje (Beighley & Moglen, 2003). Las afectaciones son más severas durante eventos de lluvia extraordinaria, pues estos generan un efecto que se ve amplificado por las transformaciones antropogénicas de las áreas de captación.

Una forma de prevenir el efecto de una lluvia extraordinaria, es la modelización hidrológica de las áreas de inundación. Esta permite identificar áreas vulnerables, y privilegiar medidas de protección civil en las zonas habitadas, o de regulación ambiental en las partes no habitadas de la cuenca.

En este trabajo se muestran los resultados de un ejercicio de modelización hidrológica en la Ciudad de Culiacán Sinaloa, que tuvo por objetivo identificar áreas vulnerables a inundación, en dos escenarios de precipitación: 1) El desbordamiento del Río Tamazula, en un evento de lluvia como el que ocurrió durante el Huracán Manuel (Septiembre de 2013, 258 mm en 24 horas); y 2) El que ocurre cada 18-20 años en eventos de precipitación en este periodo de tiempo que alcanzan los 170 mm en 24 horas. Los resultados, fueron consistentes con los registros observados en la zona durante la inundación observada durante el Huracán Manuel, mostrando el potencial de este tipo de modelos para mejorar las acciones de planeación hidrológica y planeación urbana.

## 2. Materiales y Métodos

### Área de Estudio

El área de estudio objeto de la modelización de zonas de inundación, corresponde a una sección de la ciudad de Culiacán que es atravesada por el Río Tamazula. Esta sección, que se ubica entre los 24°47' y 24°50' Norte, y los 107°20' a 107°24' Oeste, se encuentra dentro de la subcuenca Sanalona que tiene una extensión de 420,462 ha.

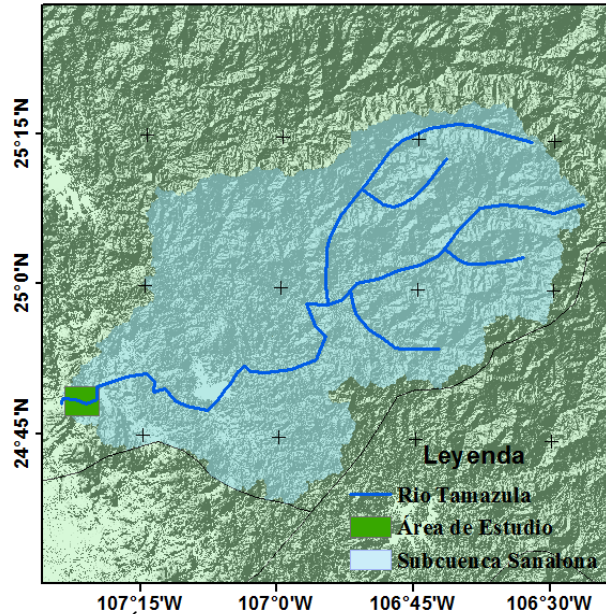


Figura 1. Área de Estudio

La modelización de áreas de inundación tuvo dos fases. En la primera se calculó el gasto o caudal máximo alcanzado por el río Tamazula en condiciones de tormenta extraordinaria; y en la segunda se modelizó cómo se comporta este caudal cuando fluye por los tramos de este río que están ubicados en la Ciudad de Culiacán.

### Fase 1: Cálculo de gastos máximos en el Río Tamazula.

En la solución de problemas hidrológicos, a menudo es necesario partir de hechos observados y análisis empíricos para definir las magnitudes y frecuencias de volúmenes de escurrimiento y caudales de conducción (Menes, Reynoso, & Martínez, 2012). Es el caso de zonas como el área de estudio, donde no hay mediciones de aforo en los tramos del río Tamazula más cercanos a la Ciudad de Culiacán.

Ante la ausencia de un valor medido de gasto, este se calculó con el método conocido como *fórmula racional* (Chow & Maidment, 1994) (Mays, 2011). Este método asume que el máximo porcentaje de escurrimiento de una cuenca ocurre cuando la totalidad de su superficie está contribuyendo al escurrimiento, y que el citado porcentaje de

escurrimiento es igual a un porcentaje de la intensidad de lluvia promedio (Menes, Reynoso & Martínez, 2012), mediante la siguiente función:

$$Q_p = \frac{C_e * I * A_c}{360}$$

Donde:

$Q_p$  – Gasto máximo, en  $m^3/s$ .

$C_e$  – Coeficiente de escurrimiento, adimensional.

$I$  – Intensidad máxima de lluvia para un periodo de retorno dado, en mm/h.

$A_c$  – Área de la cuenca, en Ha.

360 – Factor de ajuste de unidades.

En este caso, el coeficiente de escurrimiento ( $C_e$ ) es un factor calculado a partir de las condiciones físicas, los tipos de suelo, la cubierta vegetal y uso de suelo en la cuenca, pues estos influyen en el comportamiento y magnitud de los escurrimientos (Beighley & Moglen, 2003), (E. & M., 2012), (Vagaría, Gaspari, & Kruse, 2014).

Para calcular  $C_e$  fue necesario calcular el Factor K que se obtuvo a partir de la combinación entre usos del suelo y tipos de suelo, según se ejemplifica en la tabla 1:

USO DEL SUELO	Tipo de Suelo		
	A	B	C
Suelo Desnudo	0.26	0.28	0.30
Cultivos	0.24	0.27	0.30
Pastizales	0.20	0.24	0.30
Bosque (75 % cubierto)	0.07	0.16	0.24
Zonas urbanas	0.26	0.29	0.32
Caminos	0.27	0.30	0.33

**Tabla 1.** Ejemplo de Factor K, en función del tipo y uso de suelo. Fuente: Modificado de SAGARPA, 2012.

Donde:

A se refiere a suelos permeables, de textura gruesa. B corresponde a suelos medianamente permeables, de textura media; y C se relaciona con suelos casi impermeables, de textura fina.

Las capas necesarias para el cálculo del Factor K se obtuvieron del Conjunto de Datos Vectorial Edafológico escala 1:250,000 Serie II, (INEGI, 2006) y de la cartografía de Uso de Suelo y Vegetación (USyV) e Inventario Forestal serie V

(INEGI, 2011), descargadas en ambos casos de la página oficial de INEGI.

Para obtener el gasto máximo del río Tamazula, se adquirió un MDT que abarca la subcuenca Sanalona, que corresponde a una sección del Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0, resolución espacial de 15m) producido por INEGI. En este MDT se obtuvo la cuenca de escurrimiento que influye sobre el área de estudio, mediante la herramienta Watershed, que utiliza operadores de contexto espacial para delimitar áreas de drenaje en el programa ArcGIS (*GIS Tutorial 3*, 2010). Con la cuenca delimitada se generó una máscara para extraer, mediante álgebra de mapas, la información de Edafología y de USyV en las otras cartografías.

Con estas cartografías se realizó una operación de álgebra de mapas, generándose un tercer mapa, en el que cada celda es una suma simple de los mapas fuente (Edafológico y USyV). Los valores de cada celda de este tercer mapa (Edafológico+USyV), fueron reclasificados para obtener el Factor K por celda, basándose en la tabla 1.

Como K fue heterogéneo, se calculó un valor medio ponderado mediante la siguiente función:

$$K = \frac{W_1 * K_1 + W_2 * K_2 + \dots + W_n * K_n}{W_1 + W_2 + \dots + W_n}$$

Donde:

$W_i$  – Es el peso para cada valor posible de K.

$K_i$  – Es cada valor de K resultante en el mapa de Distribución del Factor K.

El peso fue asignado mediante la siguiente función:

$$W_i = \frac{A_K}{\sum_{i=1}^n A}$$

Donde:

$A_K$  – Es el área de cada valor K, resultante en el mapa de Distribución de Factor K.

Una vez obtenido el valor de K global, se calculó el coeficiente de escurrimiento ( $C_e$ ) con las siguientes funciones:

$$C_e = \frac{K(P - 250)}{200}$$

Cuando K fue menor o igual a 0.15, o bien:

$$C_e = \frac{K(P - 250)}{200} + \frac{(K - 0.15)}{1.5}$$

Cuando K fue mayor a 0.15.

En ambos casos, P es la Precipitación anual observada en la Subcuenca Sanalona (690.1 mm, CONAGUA, 2000).

Una vez calculado el  $C_e$ , se aplicó la fórmula racional. El área de la subcuenca se obtuvo de la delimitación en el MDT, y para el caso de Intensidad Máxima de Lluvia, se consideraron dos datos de precipitación como valores de intensidad máxima. El primero correspondió al registro de lluvia máxima ocurrida durante el 19 de septiembre de 2013, ocasionada por el huracán “Manuel”, que alcanzó 258 mm en Culiacán durante un periodo de 24 horas (CONAGUA, 2013a). En tal caso, al carecerse de estadísticas de lluvia por hora, se asumió que la lluvia fue homogénea durante el transcurso del día, con una intensidad máxima de 10.75 mm/h. El segundo valor de intensidad máxima fue 175.2 mm en un periodo de 24 horas, eventos que ocurren en la capital sinaloense cada 18-20 años, de acuerdo a los registros hidrológicos generados por CONAGUA.

## **Fase 2: Modelización Hidrológica de Áreas de Inundación a partir de los Gastos Máximos Calculados en la Fase Anterior.**

La modelización hidrológica se desarrolló utilizando el módulo HEC-GEORAS para ArcGIS, y los software HEC-RAS y ArcGIS, mediante el análisis de flujo, considerando que durante el periodo analizado, hubo condiciones constantes de gasto e intensidad de precipitación. Sobre estos supuestos, se resuelve la ecuación de energía unidimensional, evaluando la pérdida de energía por fricción con la ecuación de Manning, y la contracción-expansión como una función del cambio en la carga de velocidad (Mays, 2011). Sobre estas soluciones se identifica en que sitios el tirante de agua rebosa la altura de los bordos del cauce, e inunda zonas adyacentes al mismo.

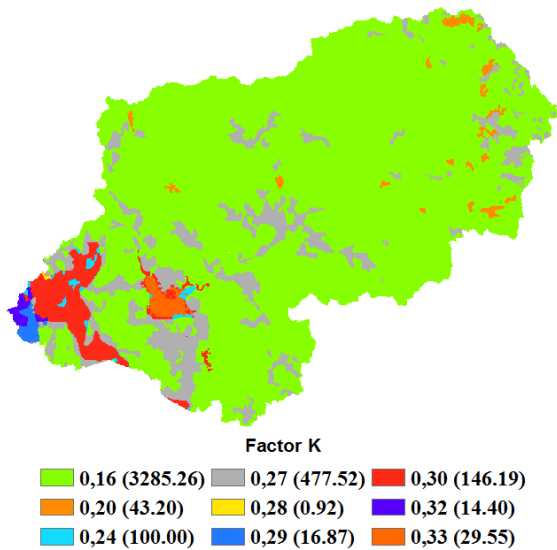
El modelado hidrológico consistió en 3 fases: generación de datos geométricos, generación de datos de flujo, y la modelación de escurrimientos (US Army Corps of Engineers, 2009).

Los datos geométricos generados, consisten básicamente en información tridimensional derivada de un MDT del área de estudio. En este caso, como se intentó modelar con el máximo de precisión, los datos geométricos se calcularon de un MDT obtenido por el autor mediante fotogrametría, con un error medio cuadrático (EMC) vertical de 12 cm (Sanz, Aguilar, & Bravo, 2015). A partir de este MDT se calcularon las dimensiones de los tramos de río considerados en la modelación: la longitud del eje del cauce, su pendiente, las alturas de las orillas. Además, mediante fotointerpretación en imágenes de alta resolución, se determinaron los coeficientes de Manning para el eje y las riberas del río. Estos representan la rugosidad correspondiente a las diferentes cubiertas del suelo sobre el eje del cauce, y a lo largo de cada sección transversal (US Army Corps of Engineers, 2009). Otra información necesaria, fue el gasto del cauce, que en este caso se obtuvo mediante la fórmula racional. Los vectores para extraer la información del MDT se generaron en la plataforma ArcGIS mediante el módulo HEC-GEORAS. Una vez generados se exportaron al software HEC-RAS, donde se generó la información geométrica necesaria para la modelización hidrológica, que fue realizada importando de nuevo los datos a ArcGIS, y procesando con Hec-GEORAS (US Army Corps of Engineers, 2010).

Mediante este procedimiento semi-automatizado se obtuvo un vector de área inundable, que fue exportado a formato raster. El mapa resultante se superpuso al mapa de “Uso y Cobertura de Suelo Culiacán-Navolato 2011” (UyCS) (Beltrán, 2013), para extraer el área afectada en distintas categorías (urbano, agrícola, natural).

## **3. Resultados y Discusión**

La figura 2, resultado de la suma de los mapas reclasificados de Edafología y USyV muestra el mapa de Distribución del Factor K y el área que ocupa cada valor de K:



**Figura 2.** Distribución del Factor K y área ocupada por cada valor de K en Km<sup>2</sup>.

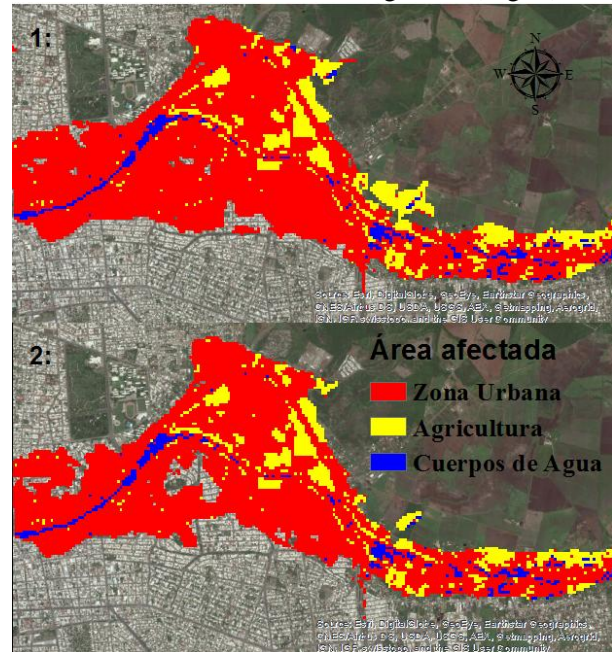
El resultado del valor de K, calculando la media ponderada con el peso inverso al área fue de 0.18. Con este se calculó el coeficiente de escurrimiento Ce, obteniéndose un valor de 0.4197. Con este coeficiente de escurrimiento se obtuvo el gasto para el río Tamazula.

Para el evento de máxima precipitación histórica (258 mm, huracán “Manuel”), se obtuvo un gasto de 5052.94 m<sup>3</sup>/s, mientras que para el evento del 15 de septiembre de 1980 (175.2 mm, CONAGUA), el cual ocurre con un periodo de retorno aproximado de 20 años con intensidades similares, se obtuvo un gasto de 3431.30 m<sup>3</sup>/s.

Es importante señalar que en la zona de la modelización no existen medidas de aforo. La estación de aforamiento más cercana se ubica 30 km río arriba, por lo que los aforos obtenidos en ese sitio, subestiman el gasto calculado en la ciudad de Culiacán. Para el caso del Huracán Manuel, se comparó el gasto calculado con el obtenido en dicha estación (2985.6 m<sup>3</sup>/s; CONAGUA, 2013b), pero fue sustancialmente menor a al valor calculado 30 km aguas abajo. Lo mejor sería contar con un registro de gastos máximos en las áreas inundables, y esta necesidad tendrá que ser cubierta en fases posteriores de la modelización.

Las áreas inundadas fueron: 597.96 ha de zona urbana y 115.65 ha de zona agrícola en el primer

caso; y para el segundo 521.91 ha de área urbana, y alrededor de 92.79 ha de zona agrícola (Fig.3.).



**Figura 3:** Áreas afectadas para distintos eventos hidrológicos; 1: Precipitación máxima posible (258 mm, Huracán Manuel). 2: Precipitación diaria por eventos con periodo de retorno de 18-20 años (175.2 mm).

Estas áreas corresponden, según los registros hemerográficos, fotográficos y las referencias de los habitantes, a las áreas inundadas realmente durante los mismos eventos. Esto revela el potencial del método para prevenir afectaciones por eventos futuros. Esta prevención es muy importante en la gestión del riesgo urbano, pues el resultado real del Huracán Manuel fue mayor a 100,000 damnificados en 90 comunidades del estado (Periódico Noroeste, 2013), además de millonarias pérdidas económicas y de infraestructura, como consecuencia de la crecida de ríos y arroyos (CNN México, 2013).

Un aspecto clave en la modelización de las áreas inundables es la selección del modelo apropiado para calcular los gastos máximos. A menudo se carece de la información necesaria, o los supuestos conceptuales y metodológicos del modelo elegido no se cumplen, y deberá asumirse que habrá imprecisión en los datos de salida. En el caso del modelo elegido en este trabajo (Formula Racional), algunos supuestos son difíciles de demostrar (lluvia homogénea durante la tormenta pe.) o se

dejan de lado aspectos que pueden influir sustancialmente en la cantidad de agua escurrida (humedad precedente del suelo) (Chow & Maidment, 1994), o en el tiempo de respuesta de la cuenca (elongación o compacidad de la cuenca, pe.) (Mays, 2011); sin embargo, los datos arrojados son muy útiles para prevenir el riesgo urbano a inundación.

#### 4. Conclusiones:

La simulación de eventos hidrológicos puede reproducir el comportamiento espacial de fenómenos reales, según se comprobó en este trabajo. La simulación ofrece ventajas para la planeación urbana: 1) El método empleado permite modelar el comportamiento del sistema hidrológico ante cambios de los usos de suelo de la cuenca, cuantificando el impacto de la deforestación o el crecimiento urbano 2) Permite modelizar la capacidad de gasto del cauce, al modificar los coeficientes de Manning, de acuerdo a soluciones ingenieriles propuestas, como el revestimiento del canal. 3) Permite modelar el impacto de los escurrimientos ante distintas condiciones de precipitación, es decir, predecir el impacto que causarían huracanes de diferentes categorías y características.

#### 5. Agradecimientos:

Este trabajo se desarrolló durante la estancia del primer autor como estudiante de verano en la UACJ Cuauhtémoc. Se agradecen los apoyos brindados por CONACYT y la Academia Mexicana de Ciencias, en el marco del XXV Verano de la Investigación Científica (2015); y los apoyos del Programa PROFAPI, otorgados por la Universidad Autónoma de Sinaloa.

#### Referencias

- Beltrán, J. C. (2013, diciembre). *Elaboración de cartografía de uso y cobertura del suelo para los Municipios de Culiacán y Navolato, Sinaloa, mediante la clasificación digital de imágenes satelitales Landsat 5 TM*. Universidad Autónoma de Sinaloa, Culiacán Rosales, Sinaloa.
- Chow, V. T., & Maidment, D. R. (1994). *Hidrología Aplicada*. Santafé de Bogotá: MC Graw Hill.
- CNN México. (2013, Septiembre 24). Las cifras del desastre por “Manuel” e “Ingrid” - Tormentas en México - Nacional - CNNMexico.com. Recuperado el 26 de agosto de 2015, a partir de <http://mexico.cnn.com/nacional/2013/09/24/las-cifras-del-desastre-por-manuel-e-ingrid>
- CONAGUA. (2000). Normales Climatológicas, Culiacán, Sin. Periodo 1981-2000.
- CONAGUA. (2013a). Reseña del huracán Manuel del Océano Pacífico. Recuperado a partir de <http://smn.cna.gob.mx/ciclones/tempo2013/pacifico/Manuel-p013.pdf>
- CONAGUA. (2013b, septiembre 20). Funcionamiento de vasos e informe hidroclimatológico.
- E., H., & M., A. (2012). The Impact of Land Use Change on the Hydrology of the Angereb Watershed, Ethiopia. *International Journal of Water Sciences*, 1. <http://doi.org/10.5772/56266>
- GIS Tutorial 3: Advanced Workbook*. (2010) (Pap/Cdr/Dv edition). Redlands, CA: Esri Press.
- Mays, L. W. (2011). *Ground and Surface Water Hydrology* (Edición: 1). Hoboken, N.J: John Wiley & Sons Inc.
- Menes, M. R. M., Reynoso, D. S. F., & Martínez, R. S. (2012). Hidrología Aplicada a las Pequeñas Obras Hidráulicas. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación.
- Periódico Noroeste. (2013, Septiembre 20). Devasta “Manuel” centro de Sinaloa. Recuperado a partir de <http://www.noroeste.com.mx/publicaciones.php?id=897094>
- Sanz, M. M., Aguilar, J. M., & Bravo, L. C. (2015). Evaluación Integral de la Calidad de Distintos MDT's, con Base en su Error Altitudinal y Posicional.
- US Army Corps of Engineers. (2009, Septiembre). HEC-GeoRAS Gis Tools for Support of HEC-RAS using ArcGIS.
- US Army Corps of Engineers. (2010, Enero). HEC-RAS River Analysis System.