

Riesgo de inundación en la subcuenca del río La Antigua, Veracruz, México

• Hugo Larios-Tlali* •

Colegio de Postgraduados, México

*Autor de correspondencia

• Elibeth Torres-Benites •

Manejo Integral de Cuencas S.A. de C.V.

• Abel Quevedo-Nolascol • Mario R. Martínez-Menes •

Colegio de Postgraduados, México

• Jorge A. Salgado-Tránsito •

Colegio Mexicano de Especialistas en Recursos Naturales, A.C.

Resumen

Larios-Tlali, H., Torres-Benites, E., Quevedo-Nolascol, A., Martínez-Menes, M. R., & Salgado-Tránsito, J. A. (mayo-junio, 2015). Riesgo de inundación en la subcuenca del río La Antigua, Veracruz, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 6(3), 39-56.

El objetivo del presente trabajo fue aplicar el modelo de simulación hidráulica HEC-RAS para delimitar las zonas con riesgo a inundación en la subcuenca del río La Antigua, Veracruz, México, utilizando la metodología del Centro Nacional de Prevención de Desastres (Cenapred), que considera la vulnerabilidad y el peligro de un sistema ante la ocurrencia de un fenómeno extremo perturbador. El modelo HEC-RAS usa ecuaciones diferenciales determinísticas que simulan el comportamiento y la dinámica de los niveles de agua en secciones transversales del cauce; su aplicación bajo condiciones de flujo no permanente y régimen mixto permitió definir las áreas de inundación alcanzadas durante una avenida extraordinaria. Para la simulación hidráulica se construyeron hidrogramas unitarios sintéticos con datos de precipitación registrados durante un evento hidrometeorológico extremo; la geometría del cauce se obtuvo con la extensión HEC-GeoRAS, herramienta que extrae y procesa información georeferenciada del Modelo Digital de Elevación (MDE) LiDAR tipo terreno y los coeficientes de rugosidad (η de Manning) se estimaron de acuerdo con las características físicas del canal. Para calibrar los datos estimados por el modelo se utilizó información hidrométrica (niveles registrados) de la estación 28003 Cardel. La aplicación de tres estadísticas de prueba: R, RMSE y DMA demostraron un alto ajuste entre datos observados versus simulados, respaldando la aplicabilidad del modelo HEC-RAS para simular, predecir y delimitar zonas de riesgo a inundación.

Palabras clave: simulación hidráulica, inundación, hidrograma, fenómenos hidrometeorológicos extremos, calibración, riesgo a inundación.

Abstract

Larios-Tlali, H., Torres-Benites, E., Quevedo-Nolascol, A., Martínez-Menes, M. R., & Salgado-Tránsito, J. A. (May-June, 2015). Flood Risk in a Sub-Basin of the La Antigua River, Veracruz, Mexico. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 6(3), 39-56.

The aim of this study was to apply the HEC-RAS hydraulic simulation model to delineate flood hazard areas in a sub-basin of the La Antigua River, Veracruz, using the methodology by the National Center for Disaster Prevention (Cenapred). This methodology takes into account the vulnerability and risk of a system to an extreme disturbance. The HEC-RAS model uses deterministic differential equations to simulate the behavior and dynamics of water levels in cross-sections of channels. By applying it under unsteady and mixed flow conditions, areas of flooding resulting from an unusually large flood can be defined. For hydraulic simulation, synthetic unit hydrographs were constructed using data recorded during an extreme hydrometeorological precipitation event. Channel geometry was obtained with HEC-GeoRAS, a tool which extracts and processes georeferenced information from a LiDAR land surface Digital Elevation Model (DEM). Roughness coefficients (η Manning) were estimated according to the physical characteristics of the channel. To calibrate the estimates calculated by the model, hydrometric information (recorded levels) was used from the Cardel 28003 station. The application of three test statistics— R, RMSE and DMA— showed a good fit between simulated and observed data, indicating the applicability of the HEC-RAS model to simulate, predict and delineate flood hazard zones.

Keywords: Hydraulic simulation, flood hydrograph, extreme hydrometeorological events, calibration, flood.

Recibido: 25/06/2014

Aceptado: 23/02/2015

Introducción

México, por su ubicación geográfica, es un país vulnerable a la ocurrencia de diversos fenómenos hidrometeorológicos, principalmente a la formación y desarrollo de ciclones tropicales (Jáuregui, 2003) en la costa del Pacífico y del Golfo de México. Un efecto de estos fenómenos –en cualquiera de sus etapas– son las inundaciones originadas por lluvias torrenciales; sin embargo, no es el único factor que determina la magnitud de estas catástrofes, también incluye la distribución espacial de la lluvia, la morfometría de los cauces, la infraestructura, la topografía, el relieve, la cobertura vegetal, el uso de suelo y las unidades edafológicas (Cenapred, 2001).

La zona costera del estado de Veracruz, por su ubicación geográfica, orografía, clima y asentamientos humanos en zonas de alto riesgo, también es un área vulnerable a estos fenómenos. En las dos últimas décadas (de 1990 a 2010), los municipios de Tuxpan, Tamiahua, Tecolutla, Nautla, San Andrés Tuxtla y La Antigua sufrieron los efectos de cinco tormentas tropicales y diez huracanes (GEV, 2011).

El paso cercano de tormentas o ciclones tropicales pueden ser causas de inundaciones, pero también lo pueden ser las depresiones tropicales menores e incluso nortes (Acevedo & Luna-Díaz, 2006). Entre 1950 y 1994 se registraron 475 inundaciones en la región Golfo Centro, de las cuales 255 ocurrieron en la región Pánuco (CSVA, 2007), la mayoría de estas catástrofes se relacionan con la ocurrencia de fenómenos hidrometeorológicos extremos.

El potencial hídrico superficial del estado de Veracruz es de los más altos de México, su escurrimiento superficial anual medio se estima en 121 millones de metros cúbicos, lo que representa 33% del escurrimiento superficial de todo el país (CSVA, 2005). Veracruz tiene una superficie de 72 815 km², 73% de su territorio está por debajo de los 200 msnm (Tejeda, 2006). El gobierno del estado de Veracruz (GEV, 2011) estima una superficie inundable de 6 275 km² (8% del territorio estatal), donde habitan 1 252 251

personas en 2 189 localidades de 118 municipios, lo que indica que uno de cada seis veracruzanos se ve afectado por las inundaciones.

Por lo anterior, es necesario e imprescindible realizar un estudio integral para estas zonas con alto riesgo a inundación, el cual debe proponer acciones, obras y programas que prevengan, reduzcan, atiendan y mitiguen los daños ocasionados por tales catástrofes. Una de las medidas no estructurales para disminuir el riesgo por inundación es la delimitación de dichas zonas.

El presente trabajo ha combinado el uso de sistemas de información geográfica (SIG), técnicas de percepción remota, trabajos de prospección en campo, análisis de información hidrometeorológica y aplicación de un modelo matemático de simulación hidráulica (HEC-RAS, versión 4.1.0) para delimitar las zonas con riesgo a inundación en la subcuenca del río La Antigua, Veracruz, una de las regiones del estado más dañadas por inundaciones en los últimos años.

Los resultados obtenidos en la simulación hidráulica fueron comparados con los niveles registrados en la estación hidrométrica 28003 Cardel (durante la ocurrencia de un fenómeno hidrometeorológico extremo), para ello se emplearon tres estadísticas de prueba (R, RMSE y DMA), cuyos valores obtenidos demostraron un alto ajuste entre datos observados *versus* simulados.

Área de estudio

La cuenca del río La Antigua se ubica entre los paralelos 19° 05' y 19° 34' latitud norte y los meridianos -96° 06' y -97° 16' longitud oeste. Tiene un área aproximada de 2 827 km², que se distribuye en los estados de Puebla y Veracruz. El río La Antigua nace en la Sierra Madre Oriental, con el nombre de río Sumidero, al oriente de la localidad González Ortega, en el estado de Puebla, a una altitud de 3 345 msnm (Espinoza, 2009). La cuenca pertenece a la Región Hidrológica 28 Papaloapan (RH28) y a la Subregión Jamapa y Otros, y está conformada por

cuatro subcuencas: RH28Bc, RH28Bd, RH28Be y RH28Bf (figura 1).

El área de estudio incluye sólo la subcuenca RH28Be (subcuenca del río La Antigua), ya que en esta zona se registran los mayores daños provocados por el desbordamiento del río La Antigua.

La subcuenca RH28Be tiene una superficie de 508.3 km², se enmarca dentro de los paralelos 19° 12' y 19° 23' y los meridianos -96° 21' y -97° 00'. Se distribuye horizontalmente con dirección oeste-este en el estado de Veracruz, sobre las subprovincias fisiográficas denominadas "Chiconquico" y "Llanura Costera Veracruzana", las cuales pertenecen, respectivamente, a la Provincia Fisiográfica X Eje Neovolcánico Transversal y a la Provincia Fisiográfica XIII Llanura Costera del Golfo Sur.

El clima predominante, según la clasificación de Köppen, modificada por Enriqueta García,

es el grupo A (cálidos húmedos tropicales), donde domina la unidad climática "Awo", con una temperatura que oscila entre 18.7° y 25.2 °C; en los meses de abril a mayo se presentan los valores más altos y de noviembre a febrero las temperaturas más frías; la temperatura media anual es de 22.3 °C. Por otro lado, la precipitación media anual es de 1 393 mm; en la parte alta de la subcuenca (zona montañosa) se han registrado valores que superan los 2 000 mm, y en la parte central se registran valores entre 900 y 1 000 mm. La evaporación media anual es de 1 340 mm; en los meses de marzo a mayo es más intensa y en el mes de diciembre se presentan los valores mínimos (SMN, 2008). De acuerdo con el conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación serie IV, escala 1:250 000 del INEGI (2012), en la subcuenca RH28Be existen seis usos de suelo y vegetación: agricultura, pastizal cultivado, bosque de encino, bosque de

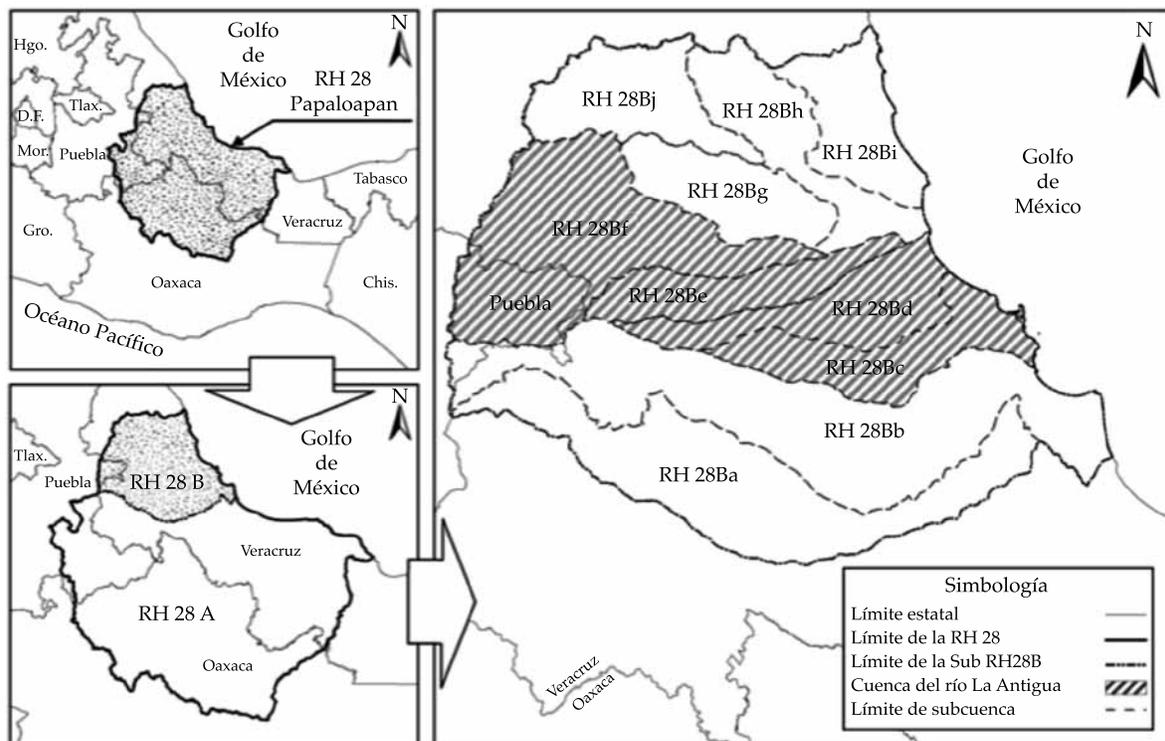


Figura 1. Ubicación geográfica de la cuenca del río La Antigua, con base en la Red Hidrográfica escala 1:50 000 del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2010.

coníferas, selva baja caducifolia y selva mediana subcaducifolia; el uso de suelo predominante es la agricultura, ocupa una superficie de 322.3 km², lo que representa 63.4% del área total. Por otro lado, con base en el Sistema de Clasificación de Suelos WRB-2000, la unidad edafológica de mayor distribución es el vertisol pélico, al ocupar una superficie de 271.7 km², lo que representa 53%, seguido del acrisol órtico y litosol, con 110.7 y 98.3 km², respectivamente.

Materiales y métodos

Descripción del modelo

El HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center-River Analysis System) es un modelo numérico creado por el Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los Estados Unidos, de uso libre y en continuo desarrollo (Turégano, 2012). El procedimiento básico de cálculo de este *software* se fundamenta en la solución de la ecuación de energía, donde las pérdidas de energía por fricción se estiman usando la ecuación de Manning; las pérdidas locales por contracción y expansión del flujo se calculan como una fracción del cambio en la velocidad entre dos secciones (USACE, 2002). Este programa utiliza el método de paso estándar (Standard Step Method), el cual consiste en determinar el tirante en una sección a partir del tirante asociado con el escurrimiento de una sección adyacente (aguas arriba o aguas abajo, dependiendo del régimen de escurrimiento). El balance de energía entre estas dos secciones se hace resolviendo la siguiente ecuación:

$$Y_2 + Z_2 + \frac{a_2 V_2^2}{2g} = Y_1 + Z_1 + \frac{a_1 V_1^2}{2g} + h_e \quad (1)$$

donde Y_1, Y_2 = tirante en la sección transversal; Z_1, Z_2 = elevaciones del fondo del canal principal; V_1, V_2 = velocidades promedio; a_1, a_2 = coeficientes de velocidad; g = aceleración de la gravedad, y h_e = pérdida de energía (Ceballos, 2011).

Según Timbadiya, Patel y Porey (2011), este razonamiento simplifica el flujo de agua como

un flujo unidimensional, asume que el tirante y velocidad solo varían en dirección longitudinal del canal, cuyo eje se supone aproximadamente a una línea recta con velocidad constante en cualquier punto de la sección trasversal.

Delimitación de las unidades de análisis

La delimitación de la unidad de análisis establece las interacciones entre los componentes del sistema y los procesos que en él ocurren durante la simulación hidráulica. El mapa base se elaboró utilizando los datos vectoriales de la RH28B, extraída de la Red Hidrológica escala 1:50 000 reportada por INEGI en su página web (consultado el 1° de julio de 2013, disponible en <http://www.inegi.org.mx>).

El análisis, como se ha señalado, incluyó sólo la subcuenca RH28Be, debido a que en esta zona se han registrado los mayores daños provocados por el desbordamiento del río La Antigua; sin embargo, considerando que el escurrimiento registrado por la estación hidrométrica 28003 es el acumulado de RH28Be y RH28Bf (figura 2), cuyos datos fueron utilizados en la calibración, se modeló el comportamiento y la dinámica de la red hidrológica RH28Be, tomando en cuenta el escurrimiento generado por RH28Bf.

En la figura 3 se observa la suma del escurrimiento de RH28Bf al tramo "Sta. María", a través del afluente conocido como "Pescados". De esta forma se modelaron ocho cauces de RH28Be y uno de RH28Bf (ver figura 2).

Para cada afluente se requirió de información específica de su zona de dominio, por lo que se dividió al área de estudio en nueve unidades de respuesta hidrológica (URH); cada una corresponde a un afluente o tramo considerado en la modelación. Los parámetros de las URH que se utilizaron para estimar los caudales se muestran en el cuadro 1.

Estimación de los hidrogramas de entrada

En la subcuenca RH28Be, los registros de precipitación son más abundantes que los de escurrimiento, por ello se eligió un método indirecto

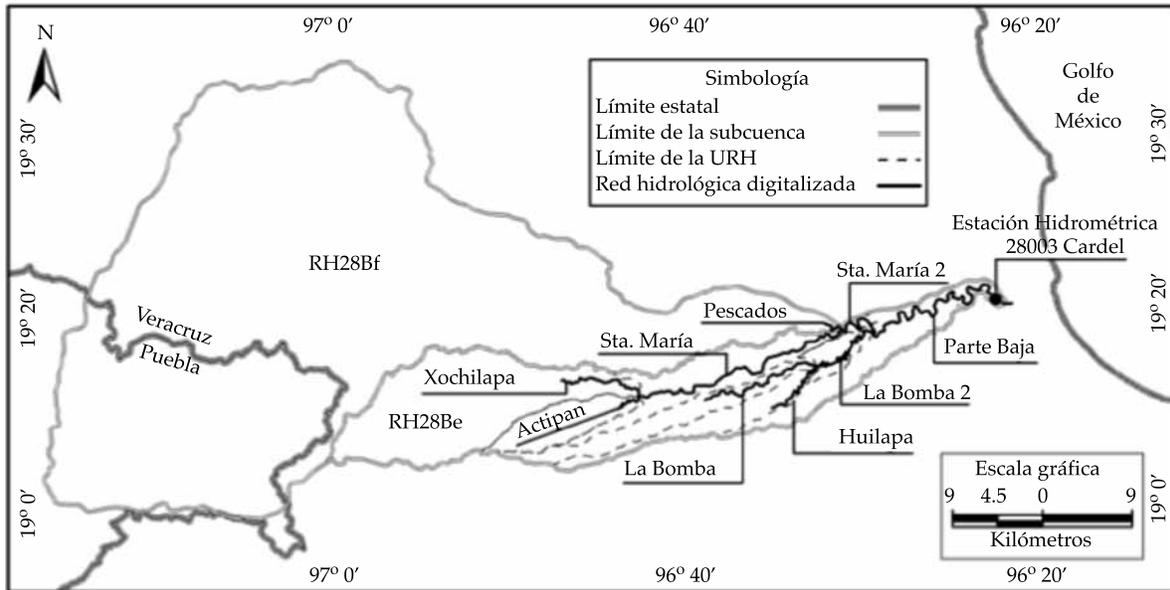


Figura 2. Distribución de las subcuencas y unidades de respuesta hidrológica (URH). Para delimitar las URH se empleó WMS, ver. 8.3 y el MDE LiDAR tipo terreno del INEGI, 2013.

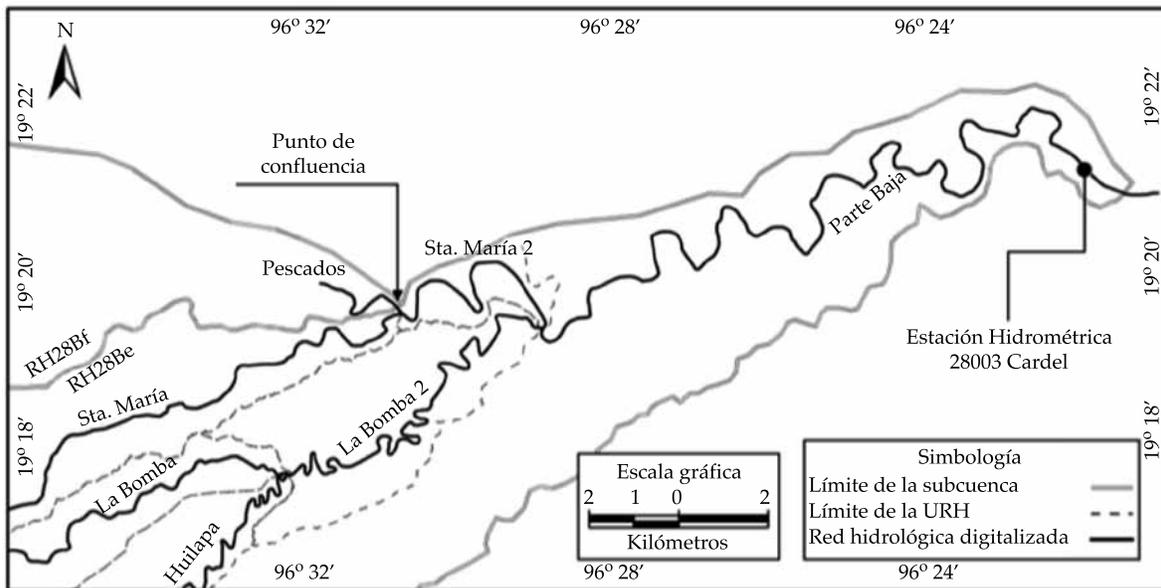


Figura 3. Confluencia del río Pescados (subcuenca RH28Bf) y el río La Antigua (subcuenca RH28Be).

para construir un hidrograma de escorrentía superficial, asociado con una lluvia de duración y profundidad unitaria. El método utilizado

fue el hidrograma adimensional curvilíneo del SCS (Soil Conservation Service), que puede ser representado por un hidrograma unitario trian-

Cuadro 1. Parámetros morfométricos de las URH.

| URH | | Parámetro | | | | |
|--------------|------|-------------------------|--------------------|--------------------|-------------------------------|---------------|
| Nombre | Núm. | Longitud del cauce (km) | Cota máxima (msnm) | Cota mínima (msnm) | Superficie (km ²) | Pendiente (%) |
| Xochilapa | I | 38.8 | 1 556 | 260 | 193.96 | 0.032 |
| Actipan | II | 16.3 | 984 | 260 | 44.91 | 0.044 |
| La Bomba | III | 35.8 | 900 | 182 | 53.96 | 0.020 |
| Huilapa | IV | 28.3 | 722 | 182 | 40.57 | 0.019 |
| Pescados | V | 113.9 | 3 721 | 98 | 1 631.67 | 0.031 |
| Sta. María | VI | 63.0 | 1 556 | 98 | 314.02 | 0.023 |
| La Bomba 2 | VII | 46.4 | 900 | 73 | 110.06 | 0.018 |
| Sta. María 2 | VIII | 120.0 | 3 721 | 73 | 1 950.06 | 0.030 |
| Parte Baja | IX | 142.2 | 3 721 | 5 | 2 145.15 | 0.026 |

gular (HUT). El método propuesto por Mockus (1957) genera un gasto pico en función del área de la cuenca y el tiempo pico según la siguiente ecuación:

$$q_p = \frac{0.555 hp_e A}{t_p} \quad (2)$$

Del análisis de varios hidrogramas, Mockus concluye que el tiempo base y el tiempo pico se relacionan mediante la expresión:

$$t_b = 2.67 t_p \quad (3)$$

el tiempo pico se expresa:

$$t_p = \frac{d_e}{2} + t_r \quad (4)$$

$$t_r = 0.6 t_c \quad (5)$$

El tiempo de concentración (t_c) se puede estimar con la ecuación de Kirpich:

$$t_c = 0.000325 \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}} \quad (6)$$

La duración del exceso de lluvia (d_e) se calcula para cuencas grandes con la siguiente ecuación:

$$d_e = 2\sqrt{t_c} \quad (7)$$

donde q_p = gasto pico unitario (m³/s/mm);

hp_e = altura de precipitación efectiva (mm);
 A = área de la cuenca (km²); t_p = tiempo pico (h);
 t_b = tiempo base (h); t_r = tiempo retraso (h);
 L = longitud del cauce principal (m), y S = pendiente del cauce (%).

Una vez generado el HUT con la metodología de Mockus, se estimó el hidrograma adimensional curvilíneo del SCS, que suaviza la forma del HUT; el hidrograma del SCS conserva las mismas unidades de tiempo y volumen que el HUT. Para obtener el hidrograma unitario del SCS se multiplican las ordenadas por el q_p y las abscisas por el t_p (Barrios & Olaya, 2007).

El hidrograma unitario se construyó con los datos de precipitación registrados en 25 estaciones meteorológicas (ubicadas dentro y en la periferia de la subcuenca RH28Be) durante la ocurrencia de un fenómeno hidrometeorológico extremo que impactó las costas de Veracruz el 17 de septiembre 2010: el huracán *Karl*. Los datos de precipitación fueron proporcionados por la Dirección Técnica del Organismo de Cuenca Golfo Centro (OCGC) de la Comisión Nacional del Agua (Conagua). Con la información de las estaciones se calculó la precipitación media ponderada de cada URH utilizando el método de las isoyetas, el cual establece un área de influencia delimitada por líneas que unen los puntos de igual valor de precipitación de acuerdo con la siguiente expresión:

$$D = \frac{\sum_i^N a_i D_i}{A} \quad (8)$$

donde D = altura de precipitación media (mm); a_i = área entre cada dos isoyetas (km^2); D_i = promedio de precipitación entre dos isoyetas (mm), y A = área total de la cuenca (km^2).

En la figura 4 se muestran los hidrogramas adimensionales curvilíneos del SCS estimados para las nueve URH, y en el cuadro 2 se tienen los valores de t_p y Q_p , valores que construyen dichos hidrogramas.

Geometría de cauces

La geometría de los cauces se obtuvo modelando con *HEC-GeoRAS*, una extensión del *HEC-RAS* que extrae la información georreferenciada de un MDE. En este trabajo se utilizó el MDE *LiDAR* tipo terreno, con una resolución de 5 m en la horizontal y 0.25 m en la vertical.

Se inició digitalizando el centro del cauce principal de la red hidrológica RH28Be, comenzando de aguas arriba hacia aguas abajo; los centros de cada afluente tributario se unieron

conforme avanzó la digitalización. Posteriormente se dibujaron los márgenes, primero el margen izquierda (del cauce principal) y después su margen derecha; de igual forma se unieron los márgenes de los afluentes tributarios de aguas arriba hacia aguas abajo. La longitud de los centros de cauce digitalizados suman 186.5 km y los márgenes suman 374.4 km (figura 5).

Para generar las secciones transversales se tomaron en cuenta las siguientes condiciones: a) el trazo de la sección parte de la margen izquierda hacia la margen derecha; b) las secciones se trazan de aguas arriba hacia aguas abajo y son perpendiculares al centro del cauce; c) las secciones no se pueden interceptar entre ellas, y d) las secciones transversales sólo pueden cruzar una sola vez al centro y márgenes del cauce. En total se crearon 2 435 secciones transversales a lo largo de los nueve cauces o tramos que integran la red hidrológica digitalizada, el intervalo entre cada sección fue de 20 m y la longitud de trazo (o ancho de sección) osciló entre 100 y 1 200 m.

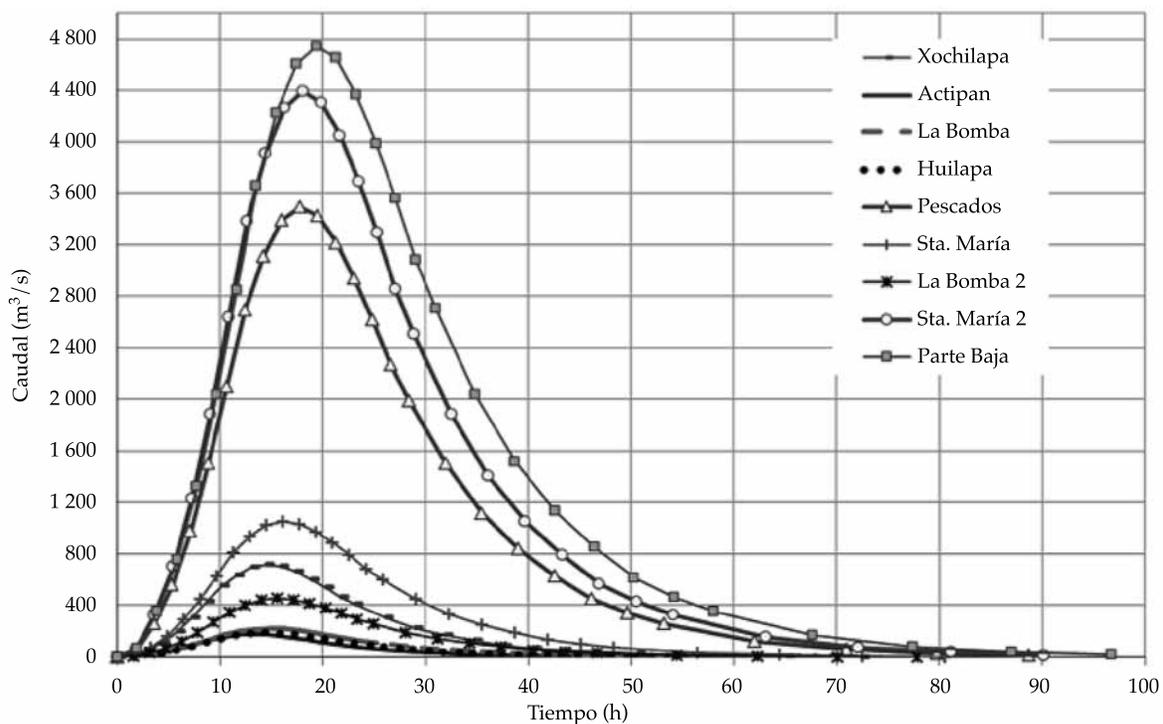


Figura 4. Hidrogramas adimensionales curvilíneos del SCS considerados en la simulación hidráulica.

Cuadro 2. Valores de t_p y Q calculados utilizando la metodología del SCS.

| Xochilapa | | Actipan | | La Bomba | | Huilapa | | Pescados | | Sta. María | | La Bomba 2 | | Sta. María 2 | | Parte Baja | |
|-----------|-------|---------|-------|----------|-------|---------|-------|----------|---------|------------|---------|------------|-------|--------------|---------|------------|---------|
| t_p | Q | t_p | Q | t_p | Q | t_p | Q | t_p | Q | t_p | Q | t_p | Q | t_p | Q | t_p | Q |
| 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 1.4 | 10.8 | 1.3 | 2.7 | 1.5 | 3.3 | 1.4 | 2.9 | 1.8 | 52.5 | 1.6 | 15.8 | 1.6 | 6.9 | 1.8 | 66.0 | 1.9 | 71.2 |
| 2.9 | 54.0 | 2.6 | 13.7 | 3.0 | 16.7 | 2.9 | 14.4 | 3.5 | 262.3 | 3.2 | 79.2 | 3.1 | 34.3 | 3.6 | 329.9 | 3.9 | 356.2 |
| 4.3 | 115.2 | 3.9 | 29.2 | 4.4 | 35.7 | 4.3 | 30.8 | 5.3 | 559.6 | 4.8 | 169.0 | 4.7 | 73.1 | 5.4 | 703.8 | 5.8 | 759.9 |
| 5.8 | 201.7 | 5.3 | 51.1 | 5.9 | 62.5 | 5.8 | 53.9 | 7.1 | 979.3 | 6.4 | 295.8 | 6.2 | 128.0 | 7.2 | 1 231.7 | 7.7 | 1 329.8 |
| 7.2 | 309.7 | 6.6 | 78.5 | 7.4 | 96.0 | 7.2 | 82.8 | 8.9 | 1 503.9 | 8.1 | 454.2 | 7.8 | 196.5 | 9.0 | 1 891.5 | 9.7 | 2 042.1 |
| 8.7 | 432.1 | 7.9 | 109.5 | 8.9 | 134.0 | 8.6 | 115.5 | 10.6 | 2 098.5 | 9.7 | 633.8 | 9.3 | 274.3 | 10.8 | 2 639.3 | 11.6 | 2 849.5 |
| 10.1 | 554.5 | 9.2 | 140.5 | 10.4 | 172.0 | 10.1 | 148.3 | 12.4 | 2 693.0 | 11.3 | 813.4 | 10.9 | 352.0 | 12.6 | 3 387.2 | 13.5 | 3 656.9 |
| 11.6 | 641.0 | 10.5 | 162.4 | 11.8 | 198.7 | 11.5 | 171.4 | 14.2 | 3 112.7 | 12.9 | 940.1 | 12.5 | 406.8 | 14.4 | 3 915.0 | 15.5 | 4 226.8 |
| 13.0 | 698.6 | 11.8 | 177.0 | 13.3 | 216.6 | 12.9 | 186.8 | 16.0 | 3 392.5 | 14.5 | 1 024.6 | 14.0 | 443.4 | 16.2 | 4 266.9 | 17.4 | 4 606.7 |
| 14.5 | 720.2 | 13.1 | 182.5 | 14.8 | 223.3 | 14.4 | 192.6 | 17.7 | 3 497.4 | 16.1 | 1 056.3 | 15.6 | 457.1 | 18.0 | 4 398.9 | 19.3 | 4 749.2 |
| 15.9 | 705.8 | 14.4 | 178.8 | 16.3 | 218.8 | 15.8 | 188.7 | 19.5 | 3 427.5 | 17.7 | 1 035.2 | 17.1 | 447.9 | 19.8 | 4 310.9 | 21.3 | 4 654.2 |
| 17.4 | 662.6 | 15.8 | 167.9 | 17.8 | 205.4 | 17.3 | 177.2 | 21.3 | 3 217.6 | 19.3 | 971.8 | 18.7 | 420.5 | 21.6 | 4 047.0 | 23.2 | 4 369.2 |
| 18.8 | 605.0 | 17.1 | 153.3 | 19.2 | 187.6 | 18.7 | 161.8 | 23.1 | 2 937.9 | 20.9 | 887.3 | 20.2 | 384.0 | 23.4 | 3 695.1 | 25.1 | 3 989.3 |
| 20.3 | 540.1 | 18.4 | 136.9 | 20.7 | 167.5 | 20.1 | 144.4 | 24.8 | 2 623.1 | 22.6 | 792.3 | 21.8 | 342.8 | 25.3 | 3 299.2 | 27.1 | 3 561.9 |
| 21.7 | 468.1 | 19.7 | 118.6 | 22.2 | 145.2 | 21.6 | 125.2 | 26.6 | 2 273.3 | 24.2 | 686.6 | 23.4 | 297.1 | 27.1 | 2 859.3 | 29.0 | 3 087.0 |
| 23.2 | 410.5 | 21.0 | 104.0 | 23.7 | 127.3 | 23.0 | 109.8 | 28.4 | 1 993.5 | 25.8 | 602.1 | 24.9 | 260.5 | 28.9 | 2 507.4 | 30.9 | 2 707.0 |
| 26.0 | 309.7 | 23.6 | 78.5 | 26.7 | 96.0 | 25.9 | 82.8 | 31.9 | 1 503.9 | 29.0 | 454.2 | 28.0 | 196.5 | 32.5 | 1 891.5 | 34.8 | 2 042.1 |
| 28.9 | 230.5 | 26.3 | 58.4 | 29.6 | 71.5 | 28.8 | 61.6 | 35.5 | 1 119.2 | 32.2 | 338.0 | 31.1 | 146.3 | 36.1 | 1 407.7 | 38.7 | 1 519.7 |
| 31.8 | 172.8 | 28.9 | 43.8 | 32.6 | 53.6 | 31.6 | 46.2 | 39.0 | 839.4 | 35.4 | 253.5 | 34.3 | 109.7 | 39.7 | 1 055.7 | 42.6 | 1 139.8 |
| 34.7 | 129.6 | 31.5 | 32.8 | 35.5 | 40.2 | 34.5 | 34.7 | 42.6 | 629.5 | 38.7 | 190.1 | 37.4 | 82.3 | 43.3 | 791.8 | 46.4 | 854.8 |
| 37.6 | 93.6 | 34.1 | 23.7 | 38.5 | 29.0 | 37.4 | 25.0 | 46.1 | 454.7 | 41.9 | 137.3 | 40.5 | 59.4 | 46.9 | 571.9 | 50.3 | 617.4 |
| 40.5 | 70.6 | 36.8 | 17.9 | 41.5 | 21.9 | 40.3 | 18.9 | 49.7 | 342.7 | 45.1 | 103.5 | 43.6 | 44.8 | 50.5 | 431.1 | 54.2 | 465.4 |
| 43.4 | 54.0 | 39.4 | 13.7 | 44.4 | 16.7 | 43.2 | 14.4 | 53.2 | 262.3 | 48.3 | 79.2 | 46.7 | 34.3 | 54.1 | 329.9 | 58.0 | 356.2 |
| 50.7 | 25.9 | 45.9 | 6.6 | 51.8 | 8.0 | 50.4 | 6.9 | 62.1 | 125.9 | 56.4 | 38.0 | 54.5 | 16.5 | 63.1 | 158.4 | 67.7 | 171.0 |
| 57.9 | 13.0 | 52.5 | 3.3 | 59.2 | 4.0 | 57.5 | 3.5 | 71.0 | 63.0 | 64.4 | 19.0 | 62.3 | 8.2 | 72.1 | 79.2 | 77.4 | 85.5 |
| 65.1 | 6.5 | 59.1 | 1.6 | 66.6 | 2.0 | 64.7 | 1.7 | 79.8 | 31.5 | 72.5 | 9.5 | 70.1 | 4.1 | 81.2 | 39.6 | 87.0 | 42.7 |
| 72.4 | 2.9 | 65.6 | 0.7 | 74.0 | 0.9 | 71.9 | 0.8 | 88.7 | 14.0 | 80.5 | 4.2 | 77.8 | 1.8 | 90.2 | 17.6 | 96.7 | 19.0 |

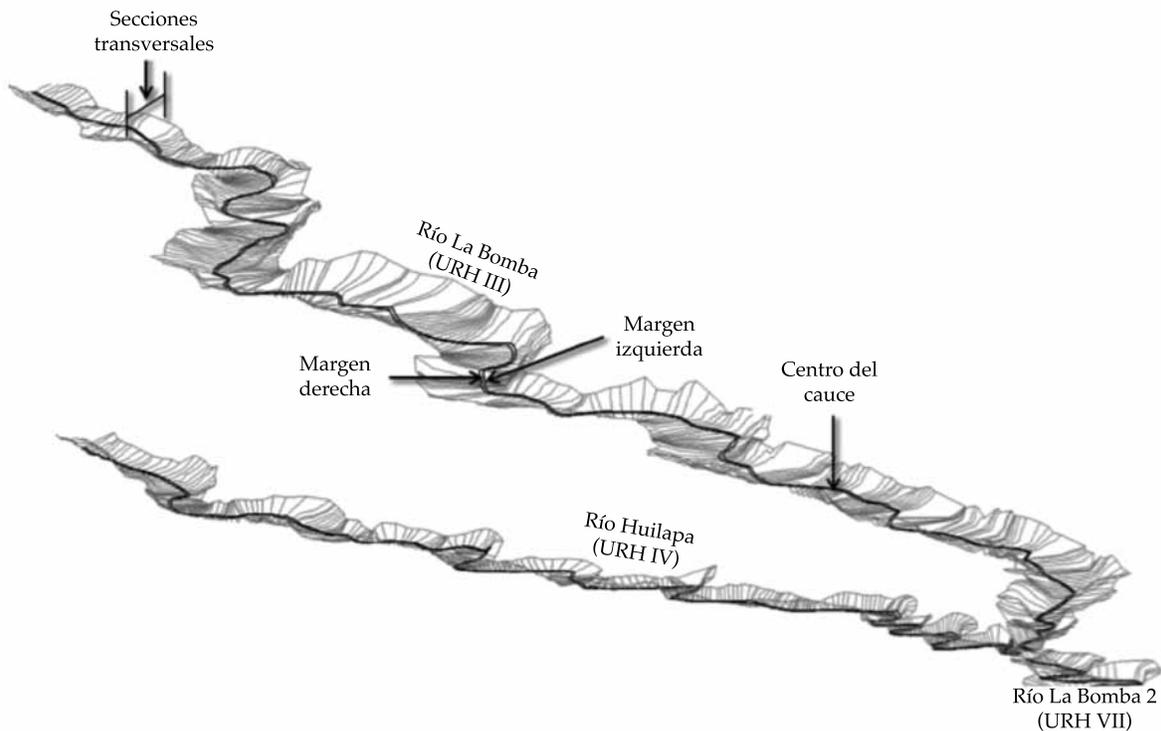


Figura 5. Secciones transversales de los ríos La Bomba, Huilapa y La Bomba 2, obtenidas con la extensión *HEC-GeoRAS*.

Determinación del coeficiente de Manning

El coeficiente de rugosidad de Manning representa la resistencia al flujo de agua en cauces sobre las llanuras de inundación; el valor es más alto cuando existe mayor rugosidad en la superficie de contacto con el flujo (Kumar, 2013). Este coeficiente debería ser calibrado a partir de información obtenida en campo (perfiles y secciones de ríos); sin embargo, cuando no se dispone de datos de aforo, se recomienda utilizar guías —para la selección del coeficiente— que propongan valores para cauces de características similares o valores obtenidos de datos experimentales (Turégano, 2012).

El modelo requiere la asignación de un coeficiente de rugosidad para la margen izquierda, derecha y centro de cada sección transversal. El valor se estableció utilizando la “Tabla del coeficiente de rugosidad de Manning”, propuesta por Chow, Maidment y Mays (1994), la cual establece el coeficiente en relación con las

características y condiciones más sobresalientes del canal, como rugosidad del fondo del cauce, cobertura y tipo de vegetación, y sinuosidad del canal, entre otras. La asignación de este coeficiente se apoyó en puntos de verificación en campo efectuados sobre el río La Antigua y sus afluentes.

En la figura 6a se observa que el fondo del cauce posee distintas características de rugosidad; por lo tanto, el fondo de cada sección transversal posee un coeficiente de Manning acorde con las condiciones del sitio. También se observa que ambas márgenes pueden ser muy diferentes en una misma sección (figura 6b), por ello cada margen posee un coeficiente propio. En total se obtuvieron 7 305 valores, estos datos se ingresaron en una base de datos dentro del entorno de *HEC-RAS*.

Además de los coeficientes de Manning correspondientes a cada sección transversal, el modelo requiere: a) la separación entre el extremo izquierdo de una sección y el extremo

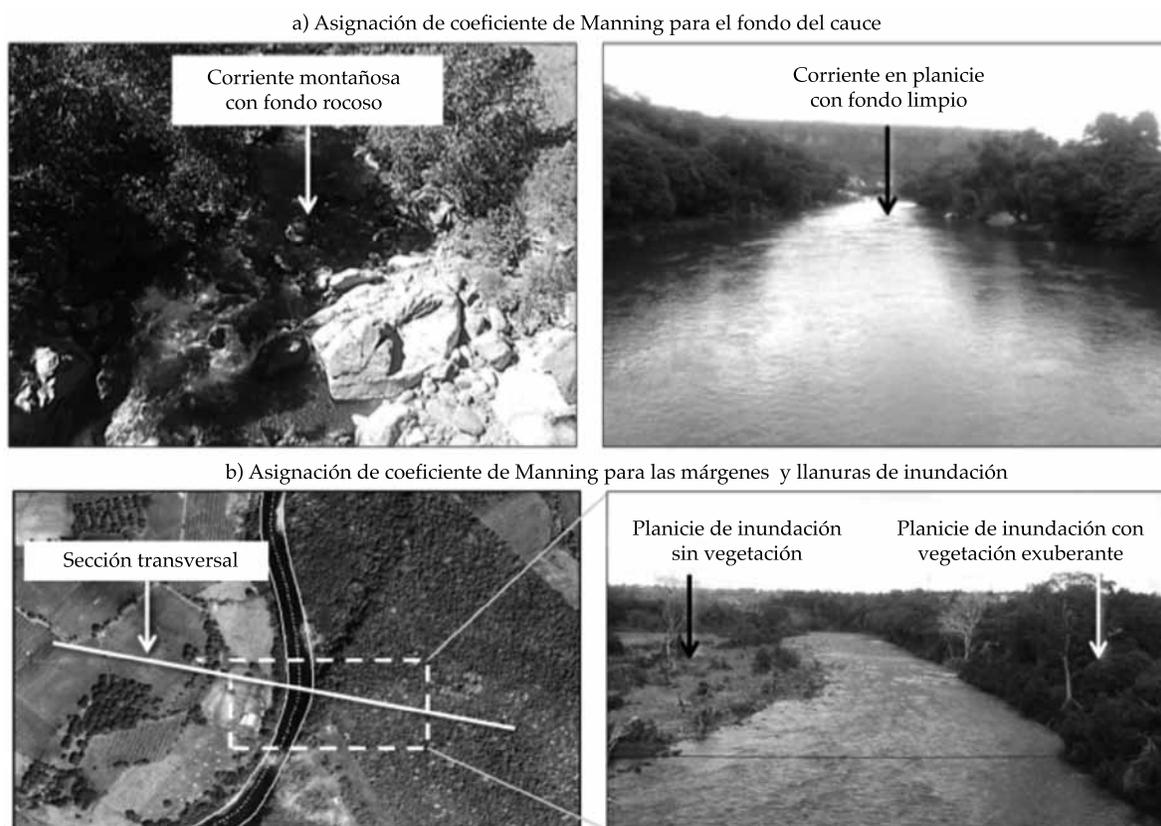


Figura 6. Asignación de los valores de Manning según tablas de Chow, Maidment y Mays (1994).

izquierdo de la sección de abajo; b) la distancia que existe entre el cruce de una sección al eje y el cruce de la sección de abajo, y c) la separación entre el extremo derecho de una sección y el extremo derecho de la sección de abajo. Estas distancias fueron medidas y se ingresaron en una base de datos dentro del entorno de HEC-RAS.

Condiciones de frontera y régimen de flujo

Una vez capturada la base de datos, se ingresaron los hidrogramas unitarios del SCS estimados para cada URH. Dada la sinuosidad de los afluentes se eligió simular bajo un régimen de flujo mixto, el cual considera las condiciones de frontera aguas arriba y abajo del cauce.

En la confluencia de un afluente tributario y el cauce principal no se requirió establecer condiciones entre dichas uniones, ya que el modelo considera automáticamente condiciones de contorno interior, sólo se definieron las condiciones en los extremos aguas arriba y abajo; para ello se ingresaron las pendientes a la que se asoció un tirante uniforme al inicio y al final de cada afluente.

Índices de evaluación estadística de ajuste del modelo

La calibración busca la correlación entre los valores de las variables generadas por el modelo y las medidas en el sistema real (Ponce, 1986). Moriasi (2007) recomienda el uso de los

siguientes índices estadísticos de prueba para determinar la correlación entre ambos valores:

La raíz del error cuadrático medio (RMSE) que se calcula con la siguiente ecuación:

$$RMSE = \left(\frac{\sum_{i=1}^N (a_i - t_i)^2}{N} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

La desviación media acumulada (DMA), según Molnar (2011), está dada por la siguiente ecuación:

$$DMA = \frac{\sum_{i=1}^N |a_i - t_i|}{N} \quad (10)$$

Y el coeficiente de correlación (R) dado por:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (a_i - \bar{a})(t_i - \bar{t})}{\left\{ \left[\sum_{i=1}^N (a_i - \bar{a})^2 \right] \left[\sum_{i=1}^N (t_i - \bar{t})^2 \right] \right\}^{\frac{1}{2}}} \quad (11)$$

donde a_i es el dato estimado por el modelo; t_i el dato que se asume como medido u observado; N , el número de observaciones o estimaciones; \bar{a} , el promedio de los datos estimados por el modelo; y \bar{t} , el promedio de los datos que se asumen como medidos (Cai, Liu, Lei, & Pereira, 2007; Cervantes, Arteaga, Vázquez, Ojeda, & Quevedo, 2013). En los dos primeros índices, el valor 0 corresponde a un ajuste perfecto, mientras que un valor más alto representa un menor ajuste. Para R , el valor 1.0 indica una alta correlación; entre 0.5 y < 1.0, una buena correlación; entre 0.0 y < 0.5, una baja correlación, y 0 que no existe correlación (ASCE, 1993).

Resultados

Al usar el modelo *HEC-RAS* se simuló el comportamiento hidráulico de los afluentes que integran la red hidrológica de la subcuenca RH28Be, esto como respuesta a un gasto o escurrimiento que generaron las lluvias del huracán *Karl* el 17 de septiembre de 2010.

La simulación hidráulica permitió obtener el tirante o nivel del flujo de agua en cada una de

las secciones transversales, sin embargo, estos resultados no pueden ser considerados como "aceptables" si no se realiza una prueba de calibración. Según Pappenberger, Beven, Horritt y Blazkova (2005), la importancia de la calibración radica en la posibilidad de aplicar sus predicciones para describir, explicar y comprender un sistema real.

Para llevar a cabo este proceso, se efectuó antes un análisis de sensibilidad que consistió en realizar diferentes simulaciones variando dos parámetros del modelo: a) distanciamiento entre secciones transversales y b) coeficiente de rugosidad.

Los resultados obtenidos por las diferentes simulaciones (en específico niveles o tirantes) se compararon con los niveles observados en la estación hidrométrica 28003 (entre las 00:00 y las 23:00 horas del día 18 de septiembre de 2010); para ello se utilizaron tres índices estadísticos de prueba que determinaron la correlación entre ambos valores.

La corrida o simulación hidráulica elegida para los fines del presente estudio fue aquella en la que se obtuvo el mejor ajuste —al aplicar los tres índices de evaluación estadística— entre valores observados *versus* simulados (cuadro 3).

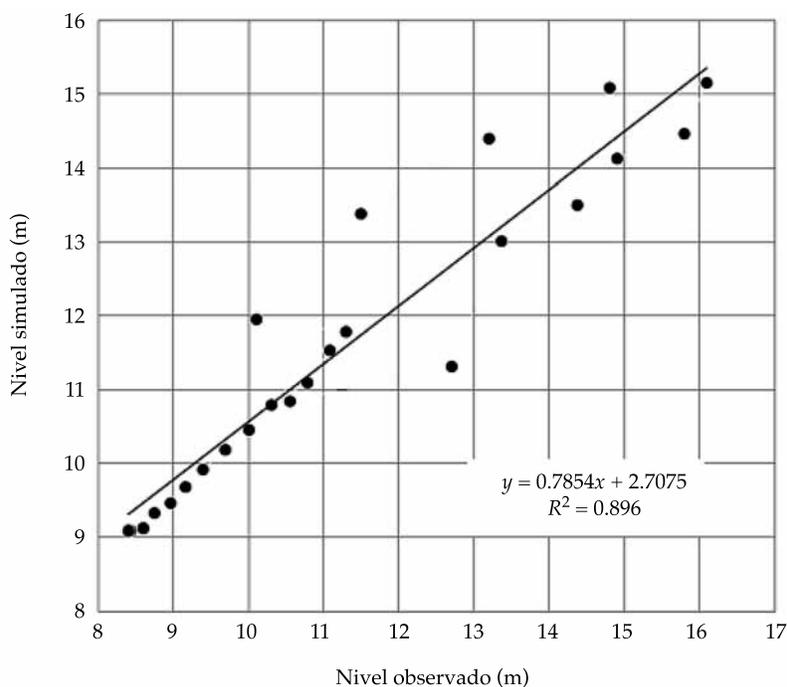
Con la información del cuadro 3 se ajustó un modelo lineal entre los niveles medidos y observados que se presentan en la figura 7, donde hay una menor relación cuando el nivel supera los 11 m; el coeficiente de determinación (R^2) para el conjunto de datos es de 0.896.

Las técnicas gráficas de evaluación son herramientas que facilitan la comparación visual de los datos simulados *versus* observados y permiten una valoración inmediata de los resultados (ASCE, 1993); sin embargo, los métodos gráficos revelan poca información sobre la calidad de los resultados y el funcionamiento del modelo. Para evaluar la capacidad de *HEC-RAS* se emplearon tres índices estadísticos de prueba: RMSE, DMA y R . El cuadro 4 muestra el resultado de estos índices utilizados en la prueba de calibración.

Los valores obtenidos indican una buena correspondencia entre datos simulados y observados, esto confirma que la modelación

Cuadro 3. Niveles observados *versus* simulados (18 de septiembre de 2010).

| Hora | Nivel observado (m) | Nivel simulado (m) | Hora | Nivel observado (m) | Nivel simulado (m) | Hora | Nivel observado (m) | Nivel simulado (m) |
|-------|---------------------|--------------------|-------|---------------------|--------------------|-------|---------------------|--------------------|
| 00:00 | 11.50 | 13.38 | 08:00 | 12.70 | 11.32 | 16:00 | 9.70 | 10.18 |
| 01:00 | 13.20 | 14.40 | 09:00 | 10.56 | 10.85 | 17:00 | 9.40 | 9.92 |
| 02:00 | 14.80 | 15.08 | 10:00 | 10.10 | 11.96 | 18:00 | 9.16 | 9.68 |
| 03:00 | 16.10 | 15.15 | 11:00 | 11.30 | 11.79 | 19:00 | 8.96 | 9.46 |
| 04:00 | 15.80 | 14.46 | 12:00 | 11.08 | 11.54 | 20:00 | 8.75 | 9.32 |
| 05:00 | 14.90 | 14.13 | 13:00 | 10.78 | 11.09 | 21:00 | 8.60 | 9.13 |
| 06:00 | 14.38 | 13.51 | 14:00 | 10.30 | 10.80 | 22:00 | 8.44 | 9.09 |
| 07:00 | 13.36 | 13.02 | 15:00 | 10.00 | 10.46 | 23:00 | 8.40 | 9.09 |

Figura 7. Niveles observados en la estación hidrométrica 28003 Cardel y simulados por *HEC-RAS*.Cuadro 4. Resultados del análisis de comparación de niveles observados y simulados por el modelo *HEC-RAS*.

| Índice de evaluación estadística | Valor |
|----------------------------------|-------|
| Raíz del error cuadrático medio | 0.866 |
| Desviación media acumulada | 0.744 |
| Coefficiente de correlación | 0.946 |

hidráulica con *HEC-RAS* es aplicable para delimitar las zonas con riesgo a inundación de la subcuenca RH28Be.

Delimitación de las zonas con riesgo a inundación

Quaas (2004) menciona que el riesgo depende de dos factores fundamentales: el peligro y la vulnerabilidad. Guevara, Quaas y Fernández (2004) definen al peligro como la probabilidad de que ocurra un fenómeno potencialmente dañino (o factor perturbador) durante un cierto periodo de tiempo y en un sitio dado. Por otra parte, Cardona (2001) define vulnerabilidad como la susceptibilidad o propensión de un sistema expuesto a un fenómeno o factor perturbador. El Cenapred (2004) define al factor perturbador como un fenómeno natural o generado por el hombre que ocasiona daños a un sistema en un grado tal que constituye un desastre.

Establecimiento del factor perturbador

Para determinar el peligro se estableció como factor perturbador el área indudable (o llanura de inundación) obtenida a través de la simulación con *HEC-RAS*. En la figura 8 se observa que el factor perturbador no representa un peligro para todas las comunidades, esto se debe principalmente al relieve de la subcuenca y la distancia que existe entre el centro de población y el río La Antigua o afluentes. La probabilidad de que ocurra un fenómeno o evento potencialmente dañino para una población no depende sólo del comportamiento hidráulico del cauce.

De las 96 comunidades que existen en la subcuenca RH28Be (donde habitan 34 877 personas, según el Censo de Población y Vivienda 2010), sólo para 23 de ellas representa un peligro el desbordamiento del río La Antigua (ver cuadro 5), fenómeno representado por el nivel

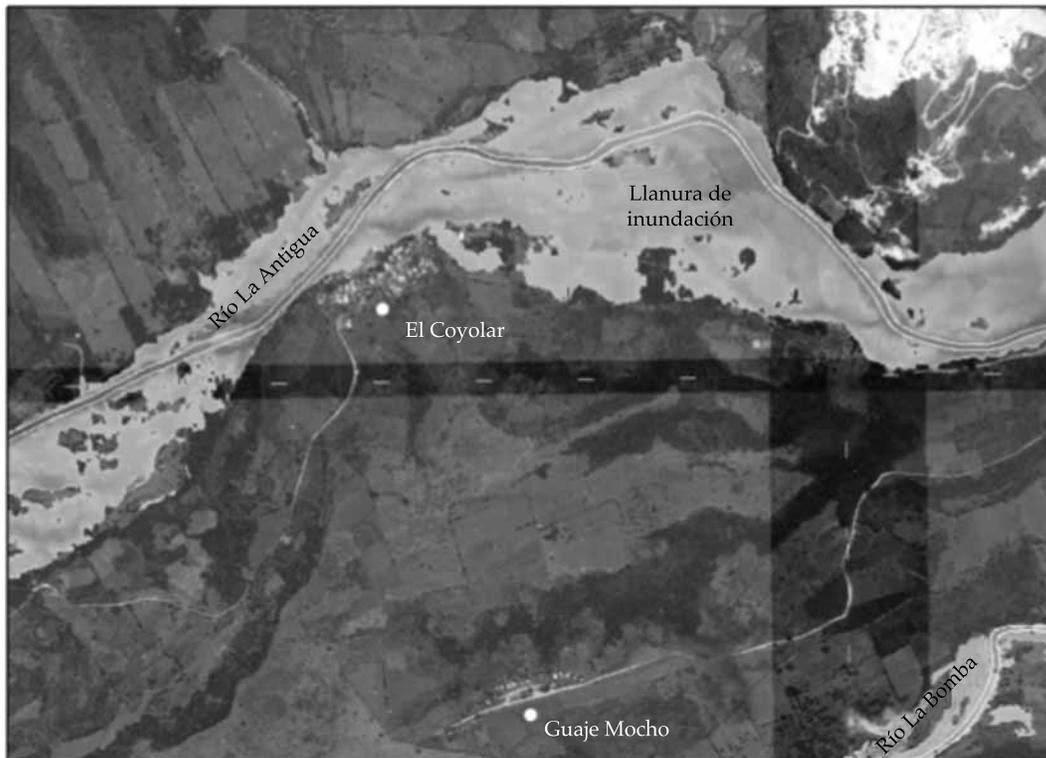


Figura 8. Factor perturbador y peligro en un tramo del río La Antigua.

o tirante que el agua alcanzó en las secciones transversales durante la simulación hidráulica.

La frecuencia o recurrencia de inundaciones depende de la frecuencia de precipitaciones excepcionalmente fuertes; un estudio realizado por la Conagua (2011) indica que el gasto generado por las lluvias del huracán *Karl* tiene un periodo de retorno de 500 años, por lo cual, según Ahmed (2008), su frecuencia sitúa a la mayoría de las comunidades (de RH28Be) en un nivel bajo de amenaza. Esta forma de evaluación se usa por lo común en países como Australia, Estados Unidos y Suiza; en el presente trabajo se utilizó la metodología del Cenapred (2011), que aplica como criterios fundamentales el peligro y la vulnerabilidad.

Determinación del índice de vulnerabilidad

Según Cardona (2001), la vulnerabilidad física corresponde al análisis de las viviendas para conocer qué tan susceptibles son a una inundación. El análisis se hizo con base en la tipología de las viviendas en el ámbito local; una vivienda es más vulnerable si los materiales de construcción son de baja resistencia, como adobe, cartón o lámina; y será menos vulnerable si está hecha de cemento, ladrillo o tabique (materiales de mayor resistencia). La información referente al tipo de material utilizado para su construcción se extrajo del Censo de Población y Vivienda 2010, editado por el INEGI (2011).

El índice de vulnerabilidad se determinó sólo para las 23 comunidades a las que representa un peligro el desbordamiento del río La Antigua y sus afluentes (como resultado de la simulación hidráulica). De esta forma se obtuvo que 11 comunidades, donde habitan 988 personas, poseen un índice de vulnerabilidad alto y muy alto; cinco comunidades, donde habitan 4 737 personas, tienen un índice de vulnerabilidad medio; y siete comunidades, donde habitan 28 043 personas, poseen un índice de vulnerabilidad bajo y muy bajo.

Cartografía de riesgo a inundación

La base conceptual para elaborar el mapa de riesgo a inundación se describe con más detalle en Cenapred (2011); sin embargo, se exponen a continuación los criterios más sobresalientes de esta metodología, que derivó en la cartografía de riesgo: a) riesgo alto es toda zona cuyo tirante es > 1 m y la velocidad es > 1 m/s; b) riesgo medio es la zona cuyo tirante está comprendido entre 0.4 y 1 m, y la velocidad fluctúa entre 0.4 y 1 m/s; c) riesgo bajo es la zona cuyo tirante es < 0.4 m y la velocidad es < 0.4 m/s.

Con base en estos criterios y los resultados obtenidos en la modelación hidráulica, se estableció el nivel de riesgo de las 23 comunidades (cuadro 5) y se generó un mapa de riesgo a inundación. La figura 9 representa un bosquejo de este mapa correspondiente a la Parte Baja del río La Antigua (URH IX). El mapa se editó a una escala tal que permite observar la distribución de las comunidades, el peligro y la vulnerabilidad de éstas a una inundación.

La modelación permitió demostrar que las lluvias asociadas con el huracán *Karl* provocaron el desbordamiento de los afluentes que integran la red hidrológica de RH28Be; sin embargo, no todos los sitios afectados representan un riesgo directo para los habitantes de las 23 comunidades, debido a que cinco de los nueve tramos simulados impactan sólo en zonas agrícolas, pastizales, o relictos de bosque y selva (los tramos contenidos en las URH II, III, IV, V y VII). Este hecho no debe exceptuar la atención de dichas zonas, pues según los reportes de Valdez y Arreola (2011), en Veracruz —a causa del huracán *Karl*— se perdió casi 100% de las cosechas en cultivos como la papaya y el maíz, lo que en términos monetarios representó más de 100 millones de pesos (mdp), y en el sector pecuario se perdieron más de 1 200 cabezas de ganado bovino, 11 000 cerdos y 20 000 aves.

Por otro lado, las URH I, VI, VIII y IX adquieren mayor importancia social. En ellas se localiza 100% de las localidades con algún nivel de riesgo a inundación. Los reportes de Armen-

Cuadro 5. Comunidades de la subcuenca RH28Be bajo algún nivel de riesgo.

| Núm. | Comunidad | Municipio | Población total | Latitud | Longitud | Nivel de riesgo |
|------|------------------------|-----------------|-----------------|---------|----------|-----------------|
| 1 | José Cardel | La Antigua | 24 846 | 19.37 | -96.38 | Alto |
| 2 | Juan Yobal Zerna | Puente Nacional | 4 | 19.29 | -96.61 | Alto |
| 3 | Los Cuates | Puente Nacional | 4 | 19.28 | -96.63 | Alto |
| 4 | Puente Nacional | Puente Nacional | 347 | 19.32 | -96.48 | Alto |
| 5 | Salmoral | La Antigua | 753 | 19.34 | -96.35 | Alto |
| 6 | Salmoral parte del Sur | Paso de Ovejas | 1 161 | 19.34 | -96.36 | Alto |
| 7 | San José de Enmedio | Puente Nacional | 6 | 19.30 | -96.58 | Alto |
| 8 | San José de La Azud | Puente Nacional | 9 | 19.30 | -96.58 | Alto |
| 9 | Yucatán | Paso de Ovejas | 543 | 19.34 | -96.36 | Alto |
| 10 | Colalco | Puente Nacional | 9 | 19.33 | 96.50 | Medio |
| 11 | El Coyolar | Puente Nacional | 390 | 19.29 | -96.61 | Medio |
| 12 | El Cuajilote | Puente Nacional | 258 | 19.30 | -96.58 | Medio |
| 13 | Mata Grande | Paso de Ovejas | 345 | 19.35 | -96.39 | Medio |
| 14 | Paso de la Cruz | Puente Nacional | 7 | 19.35 | -96.39 | Medio |
| 15 | San José Chipila | Puente Nacional | 402 | 19.29 | -96.59 | Medio |
| 16 | Santa María Tatetla | Jalcomulco | 1 777 | 19.27 | -96.71 | Medio |
| 17 | Santo Niño de Atocha | Puente Nacional | 5 | 19.30 | -96.66 | Medio |
| 18 | Chichicaxtle | Puente Nacional | 1 910 | 19.34 | -96.47 | Bajo |
| 19 | El Cedro | Puente Nacional | 71 | 19.30 | -96.57 | Bajo |
| 20 | El Manguito | Paso de Ovejas | 173 | 19.36 | -96.38 | Bajo |
| 21 | Paso Marino | Puente Nacional | 388 | 19.33 | -96.46 | Bajo |
| 22 | Tomás Vallejo | Puente Nacional | 3 | 19.29 | 96.59 | Bajo |
| 23 | Xopilapa | Tenampa | 357 | 19.28 | -96.78 | Bajo |

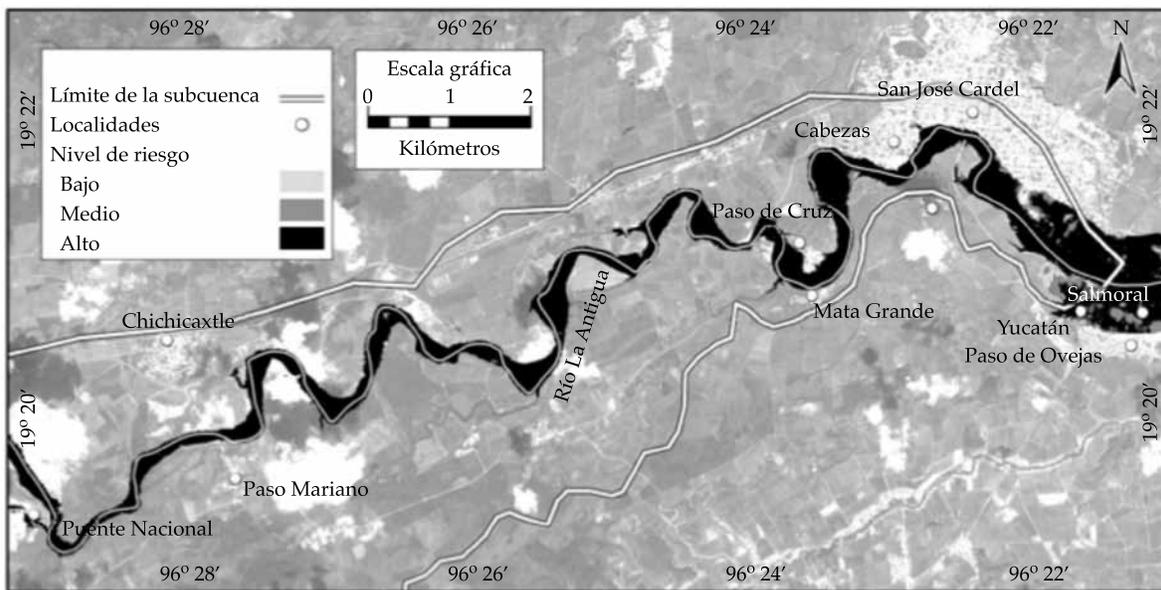


Figura 9. Mapas de riesgo a inundación correspondiente al tramo Parte Baja (URH IX) de la RH28Be.

ta et al. (2011) mencionan que el huracán dejó un saldo aproximado de 500 000 damnificados y daños estimado en 70 mil mdp.

Conclusiones

Los datos de precipitación registrados durante el huracán *Karl* permitieron estimar los hidrogramas de escorrentía superficial asociados con dicho evento meteorológico. Asimismo, los puntos de verificación en campo de uso de suelo y vegetación facilitaron la asignación del valor η de Manning (o coeficiente de rugosidad) mediante el uso de tablas con valores preestablecidos. El MDE de alta resolución permitió representar las condiciones morfométricas del río La Antigua y afluentes secundarios sin requerir un levantamiento topográfico, aunque esto último no significa que el trabajo de topografía sea innecesario o deba olvidarse. Toda esta información procesada para su uso en HEC-RAS permitió delimitar zonas de riesgo a inundación.

Los resultados obtenidos por el modelo se compararon con datos observados en la estación hidrométrica 28003 mediante el uso de índices estadísticos de prueba, los cuales indicaron una alta correlación entre ambas series de datos, respaldando de esta forma la aplicabilidad del modelo HEC-RAS para predecir la magnitud de una inundación, catástrofe muy frecuente en la subcuenca RH28Be.

Según los resultados obtenidos en la modelación hidráulica del río La Antigua y sus afluentes, así como el uso de la metodología del Cenapred (2011) para elaborar mapas de riesgo a inundación (que aplica como criterios fundamentales el peligro y la vulnerabilidad), se obtuvo que nueve localidades, donde habitan 27 673 personas, poseen un nivel de riesgo alto; ocho un nivel medio con 3 193 personas, y seis en un nivel bajo con 2 902 personas. Estos datos indican que 96.8% de la población total que habita en la subcuenca RH28Be radica en una zona con riesgo a inundación.

De la elaboración y análisis del mapa de riesgo a inundación se concluye que las comu-

nidades más cercanas al río La Antigua y cuyas viviendas en su mayoría son de materiales de baja resistencia, son las de mayor riesgo. Por el contrario, las localidades más alejadas al río La Antigua y cuyas viviendas son de materiales resistentes, se clasifican en localidades de bajo riesgo.

Cualquiera que sea el caso, desbordamientos en zonas agrícolas o centros de población, se recomienda la implementación de medidas estructurales y no estructurales contra inundaciones, a fin de prevenir, controlar y / o mitigar los daños ocasionados por estos eventos meteorológicos extremos.

Referencias

- Acevedo, R. F., & Luna-Díaz, P. A. (2006). *Principales fenómenos meteorológicos que afectaron al estado de Veracruz en el año 2005. Inundaciones en el Estado de Veracruz 2005* (pp. 39-49). Veracruz, México: Universidad Veracruzana.
- Ahmed, H. K. M. (2008). *Aplicaciones del modelo HEC-RAS para el análisis del flujo no permanente con superficie libre* (290 pp.). Quito, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional.
- ASCE (1993). Criteria for evaluation of watershed models. American Society of Civil Engineers. *Journal Irrigation Drainage Eng.*, 119(3), 429-442.
- Armenta, M. S., López, J. C., Rodríguez, E., Allan, E., Del Amo, S., Gómez, A., Mac Swiney, M. C., Niembro, A., Sánchez, O., Vázquez, M., & Velázquez, N. (2011). *La restauración ecológica como estrategia para la reducción del riesgo de desastres ante inundaciones. Inundaciones 2010 en el estado de Veracruz* (pp. 196-236). México, DF: CVICDT.
- Barrios, P. M. I., & Olaya, M. E. J. (2007). Cálculo y análisis de hidrogramas para el flujo torrencial del 22 de junio de 2006 ocurrido en la microcuenca "El Salto", Ibagué, Colombia. *Avances en Recursos Hidráulicos*, 16, 31-40.
- Cai, J., Liu, Y., Lei, T., & Pereira, L. S. (2007). Estimating reference evapotranspiration with the FAO Penman-Monteith equation using daily weather forecast messages. *Agricultural and Forest Meteorology*, 145, 22-35.
- Cardona, A. O. D. (2001). *La necesidad de repensar de manera holística los conceptos de vulnerabilidad y riesgo. Una crítica y una revisión necesaria para la gestión* (18 pp.). Ciudad de Panamá: Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina.
- Ceballos, L. J. D. (2011). Modelación hidráulica y morfodinámica de cauces sinuosos aplicación a la Quebrada La Marinilla (ANT). *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 30, 107-118.
- Cenapred (2001). *Diagnóstico de peligros e identificación de riesgos de desastres en México* (232 pp.). Serie Atlas Nacional

- de Riesgos de la República Mexicana. Centro Nacional de Prevención de Desastres.
- Cenapred (2004). *Guía Básica para la elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgo* (389 pp.). Serie Atlas Nacional de Riesgos de la República Mexicana. Centro Nacional de Prevención de Desastres.
- Cenapred (2011). *Metodología para la elaboración de mapas de Riesgo por inundaciones en zonas urbanas* (73 pp.). Serie Atlas Nacional de Riesgos de la República Mexicana. Centro Nacional de Prevención de Desastres.
- Cervantes, O. R., Arteaga, R., Vázquez, M. A., Ojeda, W., & Quevedo, A. (2013). Comparación de modelos para estimar la presión real de vapor de agua. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 4(2), 37-54.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, W. (1994). *Hidrología aplicada* (584 pp.). Santafé de Bogotá: McGraw Hill.
- Conagua (2011). *Estudio Integral del río La Antigua del estado de Veracruz* (pp. 145-146). México, DF: Comisión Nacional del Agua.
- CSVA (2005). *Programa hidráulico estatal. Resumen ejecutivo* (40 pp.). Veracruz, México: Consejo del Sistema Veracruzano del Agua.
- CSVA (2007). *Balace Hidráulico de la Cuenca del Río Sedeño* (27 pp.). Veracruz, México: Consejo del Sistema Veracruzano del Agua.
- Espinoza, T. B. (2009). *Evaluación de los recursos hídricos de la cuenca del río La Antigua, Veracruz: estado actual y ante escenarios de cambio climático* (102 pp.). Veracruz, México: Universidad Veracruzana.
- GEV (2011). *Plan Veracruzano de Desarrollo 2011-2016* (303 pp.). Veracruz, México: Gobierno del Estado de Veracruz.
- Guevara, E., Quaas, R., & Fernández, G. (2004). *Guía básica para la elaboración de atlas estatales y municipales de peligros y riesgos: lineamientos generales para la elaboración de atlas de riesgos* (pp. 15-29). México, DF: Sistema Nacional de Protección Civil-Cenapred.
- INEGI (2011). *Censo de Población y Vivienda 2010*. México, DF: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INEGI (2012). *Conjunto de Datos Vectoriales de Uso de Suelo y Vegetación serie IV, escala 1:250 000* (132 pp.). México, DF: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- Jáuregui, E. (2003). Climatology of Land Falling Hurricanes and Tropical Storms in Mexico. *Atmósfera*, 16(4), 193-204.
- Kumar, P. P. (2013). HEC-RAS Model for Mannig-s Roughness: A Case Study. *Scientific Research*, 3(3), 97-101.
- Mockus, V. (1957). *Use of Storm and Watershed Characteristics in Synthetic Hydrograph Analysis and Application*. Sacramento, USA: American Geophysical Union, Pacific Southwest Region.
- Molnar, P. (2011). *Calibration. Watershed Modelling, SS 2011*. Zürich: Institute of Environmental Engineering, Chair of Hydrology and Water Resources Management, ETH.
- Moriasi, D. N. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulation. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900.
- Pappenberger, F., Beven, K., Horritt, M., & Blazkova, S. (2005). Uncertainty in the Calibration of Effective Roughness Parameters in HEC-RAS using Inundation and Downstream Level observations. *Journal of Hydrology*, 302, 46-69.
- Ponce, V. M. (1986). Diffusion Wave Modeling of Catchment Dynamics. *Journal of Hydrologic Engineering*, 109(4), 637-638.
- Quaas, R. (2004). *Guía básica para la elaboración de atlas estatales y municipales de peligros y riesgos* (pp. 9-10). México, DF: Sistema Nacional de Protección Civil-Cenapred.
- SMN (2008). *Normales climatológicas* [en línea]. Consultado el 5 de mayo de 2014. Servicio Meteorológico Nacional. Recuperado de <http://smn.cna.gob.mx/productos/normales/cnormales.html>.
- Tejeda, M. A. (2006). *Panorámica de las inundaciones en el estado de Veracruz durante 2005. Inundaciones en el estado de Veracruz 2005* (pp. 9-20). Veracruz: Universidad Veracruzana.
- Timbadiya, V., Patel, P. L., & Porey, P. D. (2011). Calibration of HEC-RAS Model on Prediction of Flood for Lower Tapi River, India. *Journal of Water Resources and Protection*, 3(11), 805-811.
- Turégano, C. F. (2012). *Gestión de riesgo de inundación* (254 pp.). Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- USACE (2002). *HEC-RAS User Manual* (25 pp.). Washington, DC: US Army Corps of Engineers.
- Valdez, R. V., & Arreola, V. A. (2011). *Estrategias para reducir la vulnerabilidad de las inundaciones de producción de tilapia ante inundaciones. Inundaciones 2010 en el estado de Veracruz* (pp. 527-548). Veracruz: CVICDT.

Dirección institucional de los autores

Ing. Hugo Larios-Tlali
Dr. Abel Quevedo-Nolasco
Dr. Mario R. Martínez-Menes

Colegio de Postgraduados
Campus Montecillo
km 36.5 carretera México-Texcoco
56230 Montecillo, Texcoco, Estado de México, México
Teléfono: +52 (045) 5527 68 4527, (595) 9520 200,
extensiones 1384 y 1213
irnr_larios@hotmail.com
anolasco@colpos.mx
mmario@colpos.mx

M. C. Elibeth Torres-Benites

Manejo Integral de Cuencas, S. A. de C. V.
José Ma. Pino Suárez, Mz. 15, Lt. 19, Col. Netzahualcóyotl
56234 Texcoco, Estado de México, MÉXICO
Teléfono: +52 (595) 9529 824
elyt@micas-cuencas

Dr. Jorge A. Salgado-Tránsito

Colegio Mexicano de Especialistas en Recursos
Naturales, A. C.
De las Flores 8, San Luis Huexotla
Texcoco, Estado de México, MÉXICO
Teléfono: +52 (595) 9285 236
arturo.transito@gmail.com