



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

POSGRADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO
INTEGRAL DEL AGUA

MODELO HIDROLÓGICO DE ONDA CINEMÁTICA DE LA CUENCA
DEL RÍO TURBIO, GUANAJUATO, MÉXICO

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTOR EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

PRESENTA:
GREGORIO VARGAS CASTAÑEDA



DIRECCION GENERAL ACADEMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALES



OCTUBRE DEL 2015

Chapingo, Estado de México

**MODELO HIDROLÓGICO DE ONDA CINEMÁTICA DE LA CUENCA DEL RÍO
TURBIO, GUANAJUATO, MÉXICO**

Tesis realizada por Gregorio Vargas Castañeda bajo la dirección del Comité Asesor
indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado
de:

DOCTOR EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

DIRECTOR



DRA. LAURA ALICIA IBÁÑEZ CASTILLO

ASESOR



DR. RAMON ARTEAGA RAMÍREZ

ASESOR



DR. GUSTAVO ARÉVALO GALARZA

LECTOR EXTERNO



DR. ANTONIO BECERRA MORENO

DATOS BIOGRÁFICOS DEL AUTOR

El 11 de febrero de 1968 Gregorio Vargas Castañeda nació en Guadalupe de Rivera, Municipio de Irapuato, Guanajuato; el sexto hijo de Sotero Vargas y Ricarda Castañeda. Cursó sus estudios de primaria y secundaria en el mismo lugar, los de bachillerato en el Centro de Bachillerato Tecnológico Agropecuario de Rancho Nuevo de la Cruz, Abasolo, Guanajuato.

En 1987 ingresa al propedéutico en la Universidad Autónoma Chapingo y al año siguiente al Departamento de Suelos de la misma Institución, graduándose del mismo en 1992. Después de desempeñar diversas actividades laborales y productivas, en el año 2002 ingresa a la Maestría en Ciencias en Desarrollo Rural de la misma Universidad con sede en el Centro Regional Universitario Centro-Occidente de Morelia, Michoacán, posgrado del cual se gradúa en 2004. En 2011 inicia los estudios de Doctorado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, en el Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua también de la Universidad Autónoma Chapingo, graduándose en octubre del 2015.

A la fecha, su experiencia laboral lo ha llevado a trabajar en instituciones como el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) en actividades de cartografía y topografía, la Secretaría de Desarrollo Agropecuario en Guanajuato en labores de extensionismo, el Sistema Avanzado de Bachillerato y Educación Superior de Guanajuato y la Secretaría de Educación Pública como docente y como productor independiente de cultivos básicos y hortalizas.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Chapingo por toda la formación académica recibida; a todo el personal académico y administrativo que ha formado parte de esta historia.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por el apoyo económico que me fue proporcionado para realizar los estudios de Doctorado.

Al Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, por la formación científica y tecnológica proporcionada y el apoyo otorgado para llevar a buen término este ciclo formativo.

A mi comité de asesores:

- Doctora Laura Alicia Ibáñez Castillo, cuya atinada dirección me orientó en todas las etapas de la investigación, en no pocas ocasiones para retomar la dirección correcta y en las exhaustivas revisiones de los avances del proyecto.
- Doctor Ramón Arteaga Ramírez, por sus valiosas observaciones para corregir y enriquecer los diferentes escritos que conforman la versión final de la tesis.
- Doctor Gustavo Arévalo Galarza, por sus importantes contribuciones y sugerencias en el desarrollo de la investigación.
- Doctor Antonio Becerra Moreno, por su valiosa aportación para mejorar la versión final del escrito.

DEDICATORIA

A lo más valioso que tengo en la vida, mi familia:

- Ma. del Rosario Calzada Trejo; esposa y compañera en la aventura de la vida; gracias infinitas por compartir lo bueno, lo mejor y soportar juntos lo no tan bueno.
- Juan Carlos Vargas Calzada; futbolista, trabajador y alegre de corazón.
- José Braulio Vargas Calzada; futbolista, artista, inquieto de nacimiento.
- Jesús Alejandro Vargas Calzada; deportista, claro y firme en sus aspiraciones.

A mis padres:

Sotero Vargas López (Q.E.P.D.)

Ricarda Castañeda Martínez (Q.E.P.D.)

A mis hermanas y hermanos:

J. Carmen Vargas Castañeda

Ma. Inés Vargas Castañeda

Ma. Concepción Vargas Castañeda

Esteban Vargas Castañeda

Demetria Vargas Castañeda

A la familia Calzada Trejo, por sus múltiples formas de apoyo.

A todos y todas quienes por compañerismo o amistad han formado parte de mi desarrollo personal.

CONTENIDO

	Pág.
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE CUADROS	xi
Resumen	xii
1. Introducción.	1
1.1. Presentación	1
1.2. Objetivos generales	2
1.2.1. Objetivos particulares	2
1.3. Revisión de literatura	3
1.3.1. Tipos de modelos hidrológicos	4
1.3.2. El modelo HEC-HMS	6
1.4. Planteamiento del problema	7
1.5. Referencias	10
2. Desarrollo, clasificación y tendencias de la modelación lluvia- escurrimiento	12
2.1. Introducción	13
2.2. Historia de la modelación hidrológica	14
2.3. Clasificación de los modelos hidrológicos	15
2.4. Desempeño de los modelos	18
2.5. Modelos hidrológicos vigentes	18
2.6. Situación actual y tendencias	28
2.7. Calibración de modelos	30
2.8. Aplicaciones en México	31

2.8.1. Herramientas de apoyo en México para modelación de escurrimientos superficiales	33
2.9. Conclusiones	34
2.10. Referencias	35
3. Materiales y métodos	47
3. 1. La cuenca Lerma-Santiago.	47
3.1.1. Región Lerma-Salamanca	48
3.1.2. La subcuenca del río Turbio	49
3.1.2.1. Fisiografía	49
3.1.2.2. Clima	51
3.1.2.3. Hidrología	52
3.1.2.4. Tipos y uso del suelo	55
3.1.2.5. Vegetación	57
3.1.2.6. Características del área de estudio	58
3.1.2.7. Población	59
3.2. Metodología	60
3.3. Referencias	62
4. Modelo hidrológico de onda cinemática de la cuenca del río Turbio, Guanajuato, México	63
4.1. Introducción	65
4.2. Consideraciones teóricas en una simulación hidrológica superficial tradicional	65
4.2.1. El número de curva de escurrimiento	66

4.2.2. Hidrograma unitario adimensional del Servicio de Conservación de Suelos	67
4.2.3. Tránsito hidrológico de avenidas en cauces con el método de Muskingum	69
4.2.4. Tránsito de avenidas en presas	71
4.3. La teoría de la onda cinemática en un modelo lluvia-escorrimento	71
4.4. Simulación del proceso lluvia-escorrimento en la cuenca del río Turbio	77
4.4.1. Metodología	79
4.4.2. La información que alimentó a los tres modelos hidrológicos	81
4.4.3. Calibración del modelo	84
4.5. Resultados	85
4.5.1. Índices de Nash para las tres simulaciones	89
4.6. Conclusiones	91
4.7. Referencias	92
5. Resultados y discusión	99
5.1. Referencias.	103
6. Conclusiones	104
Anexos	106

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1. Áreas susceptibles de inundaciones en Guanajuato	9
Figura 1.2. Proyecto de planeación como parte del manejo de riesgos	10
Figura 2.1. Esquema de clasificación de modelos hidrológicos.	17
Figura 3.1. Estados que comprende la cuenca Lerma-Santiago	47
Figura 3.2. Regiones hidrológicas en Guanajuato	48
Figura 3.3. El río Turbio y los municipios que cruza en el estado de Guanajuato	53
Figura 3.4. La cuenca del río Turbio hasta la estación hidrométrica Las Adjuntas.	59
Figura 3.5. Diagrama de flujo del proceso de simulación	61
Figura 4.1. Hidrograma unitario adimensional e hidrograma unitario triangular equivalente	68
Figura 4.2. Conversión de cuenca natural a plano rectangular de OC	75
Figura 4.3. La cuenca del río Turbio hasta la estación hidrométrica Las Adjuntas	78
Figura 4.4. Simulación con el hidrograma unitario del SCS, y tránsito hidrológico en cauces con el método de Muskingum antes de calibrar <i>CN</i> .	86
Figura 4.5. Simulación con el hidrograma unitario del SCS, y tránsito en cauces con el método de Muskingum, una vez optimizado el <i>CN</i> .	86
Figura 4.6. Simulación de escurrimiento superficial con onda cinemática y tránsito en cauces con el método de Muskingum antes de calibrar <i>CN</i> .	87

Figura 4.7. Simulación de escurrimiento superficial con onda cinemática y tránsito en cauces con el método de Muskingum después de calibrar <i>CN</i> .	88
Figura 4.8. Simulación de escurrimiento superficial con onda cinemática y tránsito de avenidas en cauces antes de calibrar <i>CN</i> .	88
Figura 4. 9. y tránsito de avenidas en cauces después de calibrar <i>CN</i>	89
Figura 5.1. Hidrogramas con gastos pico significativos.	99
Figura 5.2. Localización de las subcuencas que generan escurrimientos significativos.	100
Figura 5.3. La cuenca del río Turbio en HEC-HMS mostrando las principales presas.	102

ÍNDICE DE CUADROS

	Pág.
Cuadro 2.1. Modelos lluvia – escurrimiento vigentes.	19
Cuadro 3.1. Tipos de suelo y texturas en la cuenca del río Turbio	56
Cuadro 3.2. Uso del suelo en la cuenca del río Turbio	57
Cuadro 3.3. Población en la cuenca del río Turbio	59
Cuadro 4.1. Características de la cuenca del río Turbio, Guanajuato.	79
Cuadro 4.2. Estaciones meteorológicas convencionales, automáticas e hidrométrica.	82
Cuadro 4.3. Mediciones de caudales en la estación hidrométrica 12391 Las Adjuntas.	84
Cuadro 4.4. Índices de Nash obtenidos en el modelo hidrológico del río Turbio	90
Cuadro 5.1. Características y resultados de las subcuencas con gastos pico significativos.	101

**MODELO HIDROLÓGICO DE ONDA CINEMÁTICA DE LA CUENCA DEL RÍO
TURBIO, GUANAJUATO, MÉXICO**
**KINEMATIC WAVE MODEL OF THE TURBIO RIVER WATERSHED,
GUANAJUATO, MEXICO**

Gregorio Vargas Castañeda¹; Laura Alicia Ibáñez Castillo²

RESUMEN

Entre los fenómenos naturales que afectan a las poblaciones en forma de desastres, las inundaciones representan en México alrededor de dos terceras partes de los mismos y, además de los daños directos a la salud y economía de las personas también afectan a la economía nacional al requerirse grandes cantidades de dinero para apoyar la recuperación de las zonas afectadas. En la cuenca del río Turbio que comprende parte de los estados de Jalisco y Guanajuato se han presentado diversas inundaciones tanto en áreas rurales como urbanas en las recientes 4 décadas, siendo la más catastrófica la del año 2003. En la presente investigación se emplea como principal propuesta el modelo hidrológico de Onda Cinemática para simular la respuesta de la cuenca en forma de producción de escurrimientos; además con fines comparativos se aplica el modelo del hidrograma unitario del Servicio de Conservación de Suelos con el método de Muskingum para tránsito de avenidas y una combinación de Onda Cinemática con Muskingum, todos ellos incluidos en el programa HEC-HMS. Los resultados obtenidos indican que la combinación Onda Cinemática-Muskingum proporciona el mejor ajuste estadístico confirmado por el índice de Nash-Sutcliffe. Asimismo, que en las subcuencas que incluyen zonas urbanas se produce casi la totalidad de los escurrimientos de la cuenca.

Palabras clave: Inundaciones, modelo hidrológico, onda cinemática.

ABSTRACT

Among the natural disasters that affect people, floods in Mexico account for about two-thirds of them. In addition to the health and economic consequences to the individuals directly affected, they also have an impact on the national economy because a large amount of money is required to support the recovery of the affected zones. In the Turbio River watershed comprising portions of Jalisco and Guanajuato states, several floods have occurred in both rural and urban areas in the past four decades, with the worst occurring in 2003. In this work the Kinematic Wave model is applied as a main option to simulate watershed response in the form of runoff production; also, for comparative purposes, the Soil Conservation Service's unit hydrograph model with the Muskingum method for flood routing is applied, and a combination of Kinematic Wave with the Muskingum method, all of which are included in the HEC-HMS program. Results show that the Kinematic Wave-Muskingum method combination provides the best statistical fit validated with de Nash-Sutcliffe efficiency coefficient. It is also shown that the subwatersheds that include urban areas produce almost the totality of the watershed runoff.

Keywords: floods, hydrological model, kinematic wave.

¹ Autor de tesis; ² Director de tesis.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. Presentación

En el contexto actual la gestión integral de los recursos hídricos a nivel cuenca ha tomado gran relevancia. Para ejercer dicha gestión es necesario contar con la mayor cantidad de información referente a los fenómenos hidrológicos que en la misma ocurren: precipitación, infiltración, escurrimientos, almacenamiento, entre otros. El desarrollo reciente de una serie de modelos en hidrología permite acercarse cada vez con mayor precisión al conocimiento completo de la dinámica del agua a diferentes escalas. Al respecto, la elección del modelo más adecuado debe obedecer a aspectos como características de la cuenca, disponibilidad de información o posibilidad de generar la necesaria, objetivos de la modelación así como el tiempo y recursos necesarios para desarrollar el proyecto.

Un modelo hidrológico es la representación de los diferentes procesos involucrados en la generación y distribución de la lluvia sobre una cuenca definida. Un modelo busca predecir la respuesta de la cuenca (escurrimientos) ante un determinado estímulo (precipitación). Los modelos pueden ser físicos, donde se representan a escala las cuencas reales, o matemáticos, los cuales parten de ecuaciones empíricas o conceptuales para representar la respuesta de la cuenca a diferentes condiciones hidrometeorológicas.

En el contexto actual de cambio climático global el uso de la modelación hidrológica se convierte en una herramienta fundamental para generar pronósticos de la conversión de lluvia en escurrimientos a nivel cuenca, haciendo uso de herramientas tan poderosas como las computadoras personales y la información hidrometeorológica que se genera en las estaciones meteorológicas convencionales, automáticas, radares meteorológicas e imágenes de satélite; información que es básica para alimentar los modelos hidrológicos actuales. El conocimiento de

la respuesta de la cuenca puede ser de utilidad práctica en diversas condiciones como son el diseño de obras hidráulicas, la gestión de aprovechamiento de agua para riego, el diseño de programas de conservación de suelo y agua así como el diseño de obras de control de avenidas para prevenir los efectos nocivos de las inundaciones.

1.2. Objetivos generales

- El objetivo central de esta investigación es simular el comportamiento del proceso lluvia-escurrimiento mediante el modelo de la onda cinemática del HEC-HMS en una región específica: la cuenca del Rio Turbio.
- Con fines de pronóstico, generar información de la respuesta de la cuenca a una tormenta específica mediante la obtención de volúmenes de escurrimiento, tiempo al pico, gasto pico y tiempo de concentración, como una contribución para mejorar el sistema de alertamiento a las poblaciones ante posibles inundaciones.

1.2.1. Objetivos particulares

- Presentar un panorama actualizado de la situación actual y perspectivas de la modelación hidrológica a nivel mundial y nacional, y la inserción del HEC-HMS en la misma.
- Emplear el modelo de onda cinemática del HEC-HMS en la simulación de escurrimientos y, con fines de comparación, emplear las combinaciones hidrograma unitario-Muskingum y onda cinemática-Muskingum para definir el de mejor ajuste estadístico.
- Identificar los factores que han causado las inundaciones en las cuatro décadas recientes en diversas poblaciones de la cuenca.

1.3. Revisión de literatura

Aunque los inicios de la modelación en hidrología se remontan a más de cien años, se acepta que su rápida evolución en las últimas 4 décadas ha correspondido con el desarrollo de la herramienta computacional. A nivel mundial (Feyen y Vázquez, 2011) mencionan las contribuciones de Mulvany (1850) en hidrología superficial, de Imbeau (1892) al relacionar la escorrentía con el gasto pico, de G.M. Brune (1953) del Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos y de Crawford y Lisle (1966) con el desarrollo del Stanford Watershed Model IV. Posteriormente Johanson *et al.* (1984) con el FORTRAN (HSPF), en 1986 el USSCS con el Número de Curva (NC), en 1986 Abbott *et al.* con el Systeme Hydrologique Europee; en 1995 Refsgaard *et al.* con el MIKE SHE y los más recientes UBC (Quick y Pipes, 1976), HBV (Bergström, 1976), Xinanjiang (Zhao *et al.*, 1980), SWAT (Arnold *et al.*, 1993), RORB (Dyer *et al.*, 1994), Tank model (Sugawara, 1995), ARNO (Todini, 1996), TOPMODEL (Ambroise *et al.*, 1996a y 1996b), GSSHA (Downer y Ogden, 2002), MOHIDLand (Braunschweig *et al.*, 2004).

En Estados Unidos las universidades de Harvard y Stanford fueron pioneras en el uso de computadoras para simular el comportamiento de las cuencas, durante la década de los 60^{as}. El modelo Stanford de Cuencas (Crawford y Lisle, 1966) que después se convirtió en el Programa de Simulación Hidrológica – FORTRAN (HSPF) (Johanson *et al.*, 1980) fue el primer modelo de importancia disponible para modelación de cuencas.

En la década de los 70^{as} el modelo más sofisticado fue el Modelo Para el Manejo de Agua de Tormenta (Storm Water Management Model, SWMM), desarrollado en 1971 por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) para abordar a detalle las variaciones en cantidad y calidad de los escurrimientos urbanos. El modelo se puede utilizar para modelar eventos independientes o para simulación continua y ha sido sujeto de actualizaciones y mejoras periódicas. Los modelos continuos como el HSPF se basan en ecuaciones de balance hídrico de

larga duración y consideran las condiciones antecedentes. Se considera que estos modelos son más apropiados para cuencas con grandes áreas de terrenos permeables. En el capítulo 3 se efectúa una revisión profunda del estado del arte en la modelación hidrológica, poniendo un especial énfasis en los modelos de uso reciente que, a su vez, sean de acceso público.

1.3.1. Tipos de modelos hidrológicos

Con frecuencia se comparan a los modelos de Parámetros Agregados contra los Distribuidos, a los de Eventos contra los Continuos y a los Estocásticos contra los Determinísticos (estos pares de modelos también se emplean como una forma de clasificación). A los de Parámetros Agregados (también llamados globales) se les considera modelos de “caja negra”, mientras que los Distribuidos describen los procesos físicos y mecanismos en el espacio. Los modelos de Eventos simulan la lluvia-escorrentía de tormentas individuales mientras que los Continuos como el SWMM tienen como inconveniente que necesitan una gran cantidad de datos de precipitación, interceptación, evapotranspiración, infiltración, humedad almacenada en el suelo, flujo superficial y flujo en corrientes, por lo que no se utilizan con la frecuencia de otros modelos. En cuanto a los modelos empíricos los hidrogramas se calculan a través de experimentaciones mientras que los conceptuales se sustentan en una base física. La mayor limitante de los modelos de simulación es la incapacidad para calibrar y verificar apropiadamente las aplicaciones cuando hay carencia de datos. Por la práctica, se acepta que el modelo más simple que describa satisfactoriamente el sistema con los datos disponibles es el que debe usarse.

A pesar de las limitaciones, los modelos de simulación aun permiten determinar de una forma lógica y científica el comportamiento hidrológico en cuencas complejas. Una vez elegido el modelo, los pasos a seguir generalmente corresponden con los que a continuación se enumeran:

- a. Selección del modelo en base a los objetivos del estudio, las características de la cuenca, la disponibilidad de datos y el presupuesto.

- b. Obtención de todos los datos de entrada necesarios: lluvia, infiltración, fisiografía, uso del suelo, características de la (s) corriente (s).
- c. Evaluar y refinar los objetivos del estudio en base a las simulaciones que se realizarán bajo diversas condiciones de la cuenca.
- d. Elegir los métodos para determinar los hidrogramas de las subcuencas y el tránsito de avenidas.
- e. Calibración del modelo usando tormentas históricas, escurrimientos y las condiciones actuales de la cuenca. Verificar el modelo usando otros eventos bajo diferentes condiciones pero manteniendo los mismos parámetros de calibración.
- f. Efectuar las simulaciones usando tormentas históricas o de diseño, varias condiciones de uso de suelo y varios esquemas de control para almacenamientos, avenidas o trasvases.
- g. Efectuar un análisis de sensibilidad de los datos de tormenta, parámetros del modelo y parámetros del hidrograma, según se requiera.
- h. Evaluar la utilidad del modelo y comentar las necesidades de cambios al mismo.

Los pasos a, b, y e son los de mayor importancia. La calibración y verificación mencionada en el punto e es determinante ya que aquí se ajustan los parámetros para alcanzar la precisión en los pasos f y g. En general, se recomienda optar por un modelo de evento determinístico con conceptos de parámetros agregados (globales) para desarrollar los hidrogramas y los procesos de inundación. Al respecto, el HEC-HMS es uno de los modelos más usados en el análisis típico de cuencas para convertir la lluvia a escurrimiento en cauces y laderas.

En nuestro país la aplicación de software especializado para modelación hidrológica es reciente y con pocos casos reportados, sobre todo de programas como SWAT y HEC-HMS. Al respecto, existe una gran área inexplorada con otros programas desarrollados en Estados Unidos y en

Europa, tanto de distribución libre como cerrada; como ejemplos se pueden citar el ANSWERS, TREX, TOPMODEL y ATHYS.

1.3.2. El modelo HEC-HMS

El Sistema de Modelación Hidrológica del Centro de Ingeniería Hidrológica o HEC-HMS es el modelo hidrológico basado en Windows que sustituye al HEC-1 y contiene muchas mejoras con respecto a su predecesor. La ventaja más notable del HMS es una interfaz gráfica fácil de usar, la cual permite la manipulación de elementos hidrológicos tales como cuencas y brazos de ríos así como las características de la cuenca. La interfaz también permite una visión rápida de resultados de cualquier objeto en el modelo. Un mapa de respaldo que contenga los límites de las subcuencas y sus corrientes puede ser agregado desde un archivo GIS como referencia visual, pero no es utilizado en los cálculos.

En HEC-HMS un proyecto consiste de tres partes: el modelo de cuenca, el modelo meteorológico y las especificaciones de control. A estas tres partes se accede desde la pantalla principal, la pantalla de definición de proyecto que abre al principio cuando se inicializa el HEC-HMS (Bedient *et al.*, 2012).

El HEC-HMS es un modelo de parámetros agregado con distribución espacial. Opera mediante la subdivisión de una cuenca en subcuencas tomando como criterio inicial los tributarios de la corriente principal. Luego se pueden agrupar por áreas aproximadamente homogéneas en la vegetación, uso de suelo, grupo de suelo y condición hidrológica. Permite simular la transformación de lluvia histórica o hipotética en gasto mediante un sistema que integra diferentes métodos hidrológicos. (Al-Abed *et al.*, 2005 citado por Miranda, 2008).

Como una alternativa a los modelos empíricos del hidrograma unitario (HU), HEC-HMS incluye un modelo conceptual de respuesta en cuencas. Este modelo representa a una cuenca como un

canal abierto (un canal abierto muy amplio) con un flujo al canal equivalente al exceso de precipitación. El modelo resuelve las ecuaciones que simulan el flujo de agua irregular en un canal abierto para calcular el hidrograma de escurrimiento en la cuenca. Este modelo es denominado el modelo de la onda cinemática (HEC-HMS 3.5 Technical Reference Manual).

El supuesto de la onda cinemática es que los efectos inerciales y de presión no son importantes y que el peso o fuerza de gravedad del fluido es aproximadamente balanceado por las fuerzas de resistencia en el fondo del lecho. El flujo de la onda deberá observarse como ascensos y descensos uniformes en la superficie por un periodo largo de tiempo. Entonces, las ondas cinemáticas representan los cambios característicos en descarga, velocidad, y elevación de la superficie del agua en el tiempo en cualquier lugar de un flujo en ladera o a lo largo de una corriente. Las ondas cinemáticas son en ocasiones clasificadas como flujos uniformes irregulares (Bedient *et.al*, 2012).

1.4. Planteamiento del problema

La cuenca del río Turbio en el estado de Guanajuato se localiza en el margen derecho del río Lerma y es tributaria del mismo. Su cauce se origina en el municipio de León y cruza los municipios de San Francisco del Rincón, Ciudad Manuel Doblado, Cuerámaro, Abasolo y Pénjamo. Las avenidas ocurridas en el mismo a partir de la década de los 70's del siglo pasado han provocado inundaciones en poblaciones de todos los municipios mencionados, con los consiguientes daños en temas como la salud de las personas, las afectaciones en sus bienes personales, la interrupción de sus actividades económicas y pérdidas en las actividades agrícolas. En el Diario Oficial de la Federación (DOF) con fecha 25 de julio del 2003 se publicó la Declaratoria de Desastre Natural para diversos municipios del estado de Guanajuato. En el mismo se lee que: “Entre finales del mes de junio y principios del mes de julio, se presentaron

fuertes lluvias en los Municipios en comento, de la cuenca alta del río Turbio, lo que dio como consecuencia un desbordamiento en el río a la altura de los Municipios de Abasolo y Pénjamo, el 10 de julio del año en curso. Las inundaciones impactaron directamente a casi dos mil personas, se afectaron más de 14 mil hectáreas, la mayor parte en el Municipio de Pénjamo. También por motivo de las inundaciones, se destruyeron 16 casas y se afectaron más de 400 de ellas. Además, se presentaron daños en 33 caminos. Por lo tanto, en opinión de la Comisión Nacional del Agua (CNA), ocurrió desastre por inundación en los Municipios de Abasolo, Pénjamo, Cuerámara y Romita del Estado de Guanajuato.” Con base en lo anterior, se determinó procedente declarar como zona de desastre a los municipios antes mencionados del Estado de Guanajuato (DOF, 25 de julio del 2003).

Asimismo para el año 2007 se reportó que: El desbordamiento de los afluentes del Río Turbio en las zonas urbana y rural de San Francisco, Purísima y Abasolo causó inundaciones en 417 viviendas y pérdidas en cientos de hectáreas de cultivo del maíz, frijol y hortalizas. Al pronosticarse tormentas de magnitud para las siguientes 48 horas, Protección Civil estableció una alerta a lo largo del río Turbio luego de que el cauce comenzó a derramar sus aguas (Periódico a.m. 5 de Julio del 2007).

Desde hace algunos años, Abasolo se ha visto afectada principalmente en la zona noroeste que es donde comienza el cauce del Río turbio dentro del municipio; en comunidades como Los Sauces, Mexiquito, El Alacrán, La Carroza, San Francisco de la Soledad, entre otros, se han visto afectadas viviendas y terrenos agrícolas, por eso representa tanta importancia el hecho de tomar medidas preventivas (Dirección de Comunicación Social, H. Ayuntamiento de Abasolo, Gto. 12 de abril del 2012).

En la figura 1.1 se muestran las áreas susceptibles a inundación en Guanajuato; en esta se puede apreciar que las mismas se concentran sobre todo en el sureste y suroeste del estado.

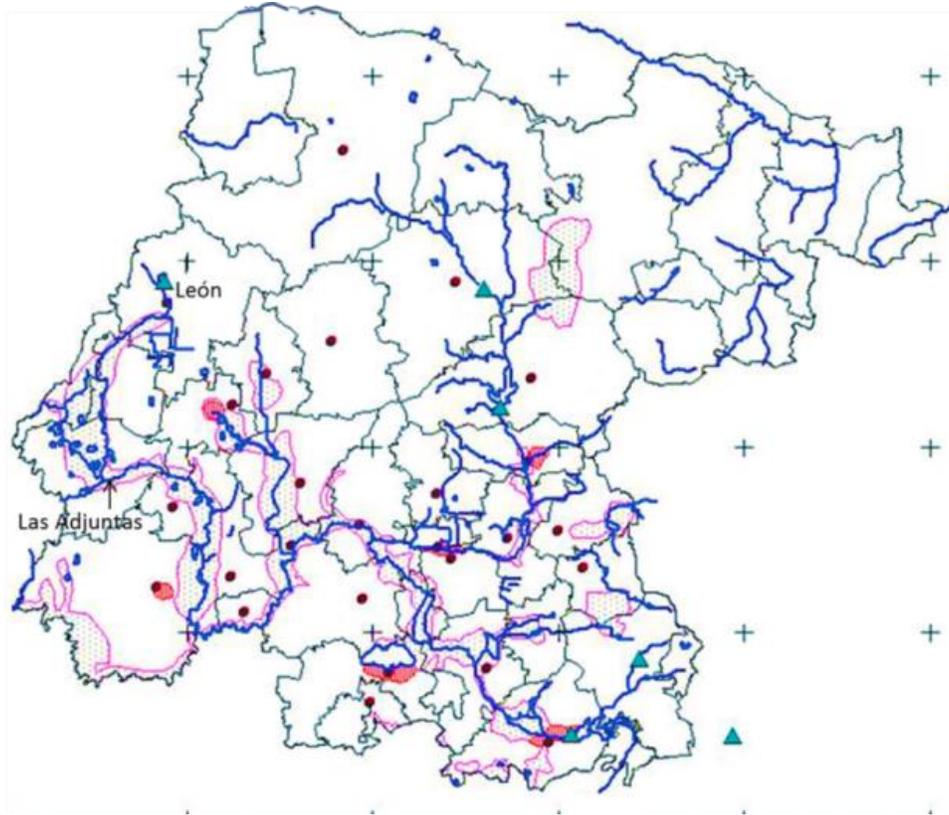


Figura 1.1. Áreas susceptibles de inundaciones en Guanajuato (Matías *et al.*, 2007)

Ante este panorama, en el presente trabajo se plantea simular la respuesta de la cuenca a una tormenta extrema (máxima), definida en términos de producción de escurrimientos y tiempo de ocurrencia del gasto pico, empleando la metodología de la onda cinemática mediante el programa del Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System (HEC-HMS) del United States of América Corps of Engineers (USACE, 2000). Con lo anterior, se pretende contribuir en una fase de la evaluación de riesgos ante inundaciones en la cuenca que aporte conocimientos para el análisis de riesgos. En la figura 1.2 se muestra el esquema general propuesto por Plate (2002) para establecer la mencionada evaluación el cual contempla medidas a considerar antes, durante y después de un evento de inundación.

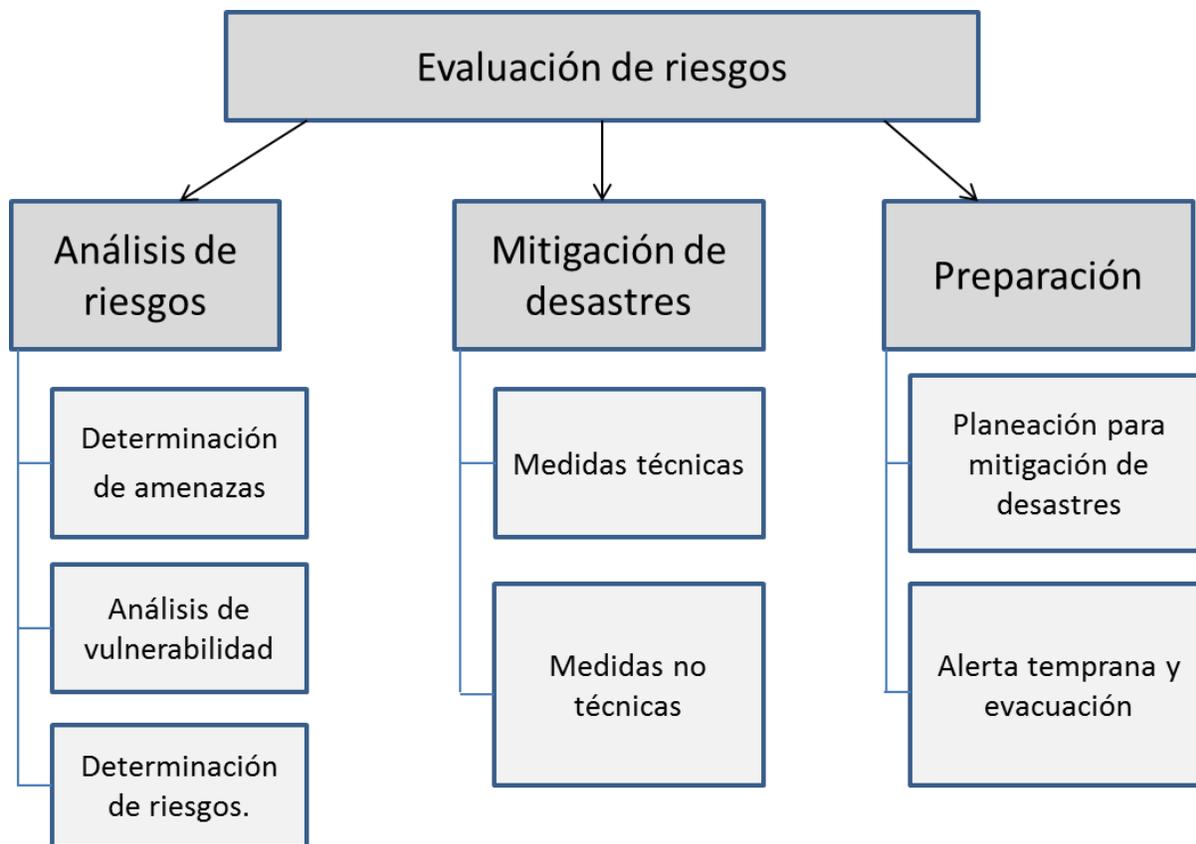


Figura 1.2. Proyecto de planeación como parte del manejo de riesgos (Plate, 2002).

1.5. Referencias

Bedient, P. B., W. C. Hubert. (2012). Hydrology and Flood Plain Analysis. Third Edition.

Diario Oficial de la Federación. (2003). 25 de julio.

Feyen, J., R. F. Vázquez Z. (2011). Modeling hydrological consequences of climate and land use change - Progress and Challenges. MASKANA. 2(2):83-100. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/5423/1/MASKANA%20si7285%20%287%29.pdf>

Matías, R. L.G., O. Oropeza O. J. Lugo H., M. Cortez V., E. Jáuregui O. (2007). Análisis de las principales causas de las inundaciones de septiembre del 2003 en el sur del Estado de Guanajuato. Investigaciones Geográficas. 64:7-25

Miranda, A. L., L. A. Ibáñez C., J. R. Valdez L., P. Hernández-de la R. (2008). Modelación hidrológica empírica del gasto de 100 años de periodo de retorno del Río Grande, Tlalchapa, Guerrero en dos escenarios de uso del suelo. Revista Agrociencia No. 43

Periódico a.m. (2007). 5 de Julio.

Plate, E.J. (2002). Flood risk and flood management. Journal of Hydrology. 267:2–11. U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. (2000). HEC-HMS Technical Reference Manual. Davis, California

U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. (2010). HEC-HMS Ver 3.5. User's Manual. Davis, California

U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. (2010). HEC-Geo HMS Ver 5.0 User's Manual. Davis, California

<http://www.eldiariodechihuahua.com.mx/notas.php?IDNOTA=70468&IDSECCION=El%20Pa%C3%ADs&IDREPORTERO=De%20la%20Redacci%C3%B3n>

CAPÍTULO 2

DESARROLLO, CLASIFICACIÓN Y TENDENCIAS DE LA MODELACIÓN LLUVIA- ESCURRIMIENTO²

Gregorio Vargas-Castañeda; Laura Alicia Ibáñez-Castillo; Ramón Arteaga-Ramírez

RESUMEN

En el presente trabajo se realiza una revisión histórica mundial de la modelación del proceso lluvia-escorrimento desde sus inicios a mediados del siglo XIX con el método racional, pasando por la teoría del hidrograma unitario, el empleo de las computadoras, hasta llegar a la aplicación de los filtros de Kalman y las redes neuronales artificiales para alcanzar una mayor precisión numérica en diseño de estructuras hidráulicas y pronóstico de avenidas. En los países en desarrollo, como México, los modelos más usados son: (1) aquellos que estén disponibles de manera gratuita y con foros abiertos de usuarios compartiendo sus dudas, (2) aquellos con fortaleza teórica-práctica, y, (3) en los que estén disponibles los datos para alimentar y calibrar el modelo.

Palabras clave: Modelos matemáticos, modelos hidrológicos, modelo concentrado, modelo distribuido.

ABSTRACT

This paper presents a historical review of the rainfall-runoff modeling development beginning in the middle XIX century with the rational method, going through the unit hydrograph, the use of computers for modeling, until arriving to Kalman Filter and neural networks to improve the precision of hydraulic structure design and flood prediction. In developing countries, as Mexico, the most used models are: (1) those that are freely available and with open forum to share questions, (2) those with theoretical-practical strength, and, (3) with easily available input and output data to feed and to calibrate the model.

Key words: Mathematical models, hydrological models, lumped model, distributed model.

2.1. Introducción

Un modelo es una representación de un sistema real, natural o construido por el hombre (Dingman, 2002); dicha representación es más simple que el sistema real, por lo que puede representar algunas características del sistema prototipo (el real), pero no todas (Doodge, 1986). En el ambiente de la hidrología, en general, se suele dividir a los modelos en (a) físicos, es decir modelos a escala que se construyen en un laboratorio, y (b) modelos matemáticos, los cuales a través de ecuaciones describen el sistema y los fenómenos ocurriendo en el sistema. Diversos autores trabajando en el ambiente de los modelos hidrológicos reconocen que, en general, la utilidad de los modelos es que nos permiten comprender mejor cómo funciona el sistema que se estudia y que nos permiten hacer predicciones del comportamiento del sistema; si se conoce mejor el sistema y se predice su comportamiento, se podrá tener un mejor control y/o operación del sistema (Doodge 1986; Dingman 2002; Ponce, 2004).

Los modelos físicos han sido ampliamente usados en Hidráulica y en Hidrología Subterránea, pero en general, en los últimos años se prefieren los modelos matemáticos ya que son más baratos y flexibles (Dingman, 2002). Además con el desarrollo de las computadoras, todos ellos han sido llevados a software o paquetes de cómputo hidrológico amigables con el usuario. De acuerdo a Ponce (1994) muchos de los modelos hidrológicos, sobre todo aquellos que estudian las aguas superficiales, se desarrollan en el marco de referencia de una cuenca; el modelo de una cuenca se ha convertido en un conjunto de abstracciones matemáticas describiendo fases relevantes del ciclo hidrológico, con el objetivo de simular la conversión de precipitación en escurrimiento. De acuerdo a Ponce (1994) la tarea de modelar tiene cuatro fases: (1) seleccionar el tipo de modelo, (2) formulación y construcción del modelo, (3) Probar o calibrar el modelo, y, (4) aplicar el modelo ya en la vida diaria.

La ingeniería hidrológica define que los modelos hidrológicos son útiles en la fase de diseño de obras hidráulicas y en el pronóstico de algunas fases del ciclo hidrológico (Doodge 1986; Dingman 2002; Ponce, 2004), como por ejemplo un sistema de alerta temprana contra inundaciones. Dingman (2002) establece que la mayor parte de la investigación actual en hidrología está enfocada a mejorar nuestra habilidad para predecir los efectos de cambios en el uso de la tierra y los efectos del cambio climático en el balance hidrológico, en predecir niveles de agua en los acuíferos, y en predecir la variabilidad de los escurrimientos y de la calidad del agua, desde que baja de las laderas hasta que cruza la cuenca para desembocar en el mar.

Dados los conceptos y hechos, expresados anteriormente, en este trabajo se revisará el desarrollo histórico de los diversos modelos hidrológicos más ampliamente usados hasta llegar a los más populares en estos tiempos, incluyendo una revisión de su situación en México. Cabe aclarar que los modelos hidrológicos en los cuales se enfoca este trabajo, son en los de Hidrología Superficial. Sin embargo, dado que el movimiento de las aguas superficiales, es un proceso importante que arrastra los sedimentos, también se hablará de modelos hidrológicos que cubren la parte de pérdida de suelo que en muchas ocasiones condiciona la producción agrícola.

2.2. Historia de la modelación hidrológica

Los orígenes de la modelación lluvia – escurrimiento en un sentido amplio pueden encontrarse en la segunda mitad del siglo XIX, surgiendo en respuesta a tres tipos de problemas de ingeniería: diseño de alcantarillas urbanas, diseño de sistemas de drenaje para recuperación de suelos y diseño de vertedores en embalse. En todos ellos, el gasto de diseño era el parámetro de mayor interés (Todini, 1988). El origen de la modelación matemática se remonta al desarrollo del método racional por Mulvany (1850) y un modelo de evento por Imbeau (1892) para relacionar el pico de escurrimiento de una tormenta con la intensidad de la lluvia (Singh y Woolhiser, 2002).

Algunos de los primeros modelos hidrológicos fueron formas del método racional usado para precipitación en estimaciones de escurrimientos basados en el comprensivo e incisivo trabajo de Mulvany (1850) para el diseño de alcantarillas, drenaje urbano y vertedores (Kampf y Burgues, 2007). Para la década de los años 20 del siglo pasado y ante la necesidad de desarrollar estudios en cuencas de mayor tamaño se creó el “método racional modificado”, al considerar la distribución no uniforme, en espacio y tiempo, de la lluvia y las características de la cuenca.

Sherman (1932) introduce el concepto de hidrograma unitario para relacionar el escurrimiento directo a la lluvia exceso. Más o menos simultáneamente, Horton (1933) desarrolla una teoría de la infiltración para estimar la lluvia exceso y mejorar las técnicas de separación del hidrograma (Todini, 1988).

En los 50^{as} se dio un salto cualitativo muy importante al incorporarse el enfoque de sistemas para el análisis de sistemas dinámicos complejos. Este fue el periodo de origen de los modelos conceptuales. Autores como Nash, Prasad, Delleur, Wiener, Tikhonov, Eagleson, Natale y Todini, Amorocho y Orlob, Todini y Wallis, durante las décadas de los 60^{as} y 70^{as} centran sus esfuerzos en la derivación del hidrograma unitario en su forma discretizada (la gráfica unitaria) de datos muestreados (Todini, 1988).

2.3. Clasificación de los modelos hidrológicos

Los dos métodos de clasificación más usados son los que de acuerdo a la descripción de los procesos físicos agrupan a los modelos en conceptuales y físicamente basados, y de acuerdo a la descripción espacial de los procesos en la cuenca como concentrados (“lumped” en Inglés) y distribuidos (“distributed” en Inglés). Los modelos teóricos, denominados también modelos físicamente basados, presumiblemente son las consecuencias de las leyes más importantes que gobiernan el fenómeno (Xu, 2002). Los modelos hidrológicos pueden clasificarse en cuatro

grupos: puramente estocásticos, integrales agregados, integrales distribuidos y diferenciales distribuidos; los tres últimos considerados como modelos causales (Todini, 1988); o en las siguientes categorías: 1) Modelos de simulación por eventos o continuos, 2) Modelos conceptuales e hidrodinámicos, 3) Modelos de parámetros agregados o distribuidos, y 4) Modelos con parámetros ajustados físicamente determinados o empíricamente derivados (Knapp *et al.*, 1991). En términos de discretización espacial o resolución se puede identificar una escala ascendente de sofisticación comenzando por los modelos concentrados que consideran a la cuenca completamente homogénea, siguiendo con los semidistribuidos que calculan las aportaciones a la avenida de áreas separadas o subcuencas consideradas homogéneas al interior de las mismas, hasta los completamente distribuidos en los cuales la cuenca se divide en áreas unitarias elementales como una malla con celdas de una resolución igual a la del modelo digital de elevación y la avenida pasa de un nodo al otro conforme el agua drena a través de la cuenca (Xu, 2002).

De entre los esquemas planteados para clasificar a los modelos hidrológicos uno de los más comprensivos fue introducido por Clarke (1973). En este esquema los modelos fueron considerados ya sea estocásticos, con las variables del modelo mostrando variación aleatoria; o determinísticos, con las variables del modelo consideradas libres de ésta. Tanto los modelos estocásticos como los determinísticos fueron clasificados como conceptuales o empíricos, de estos los conceptuales se aproximaban de alguna manera a los procesos físicos (Kampf y Burges, 2007). Dentro de estos grupos, los modelos podrían ser tanto lineales como no lineales y a su vez agregados, probabilísticamente distribuidos o geoméricamente distribuidos.

Los modelos determinísticos se pueden clasificar de acuerdo a si el modelo da una descripción agregada o distribuida del área considerada y si la descripción de los procesos hidrológicos es empírica, conceptual o más físicamente basada. Un modelo agregado implica que la cuenca es

considerada como una unidad computacional. Un modelo distribuido, por otro lado, proporciona una descripción de los procesos de la cuenca en puntos de un mallado computacional georreferenciados al interior de la misma. Un enfoque intermedio es un modelo semidistribuido, el cual emplea un tipo de distribución, ya sea en subcuencas o en unidades de respuesta hidrológica, donde las áreas con las mismas características se agrupan en unidades sin considerar su localización al interior de la cuenca (Refsgaard, 2007). En fin, hay diversas clasificaciones, pero la figura 2.1 muestra una propuesta de clasificación de fácil comprensión (Singh, 1988).

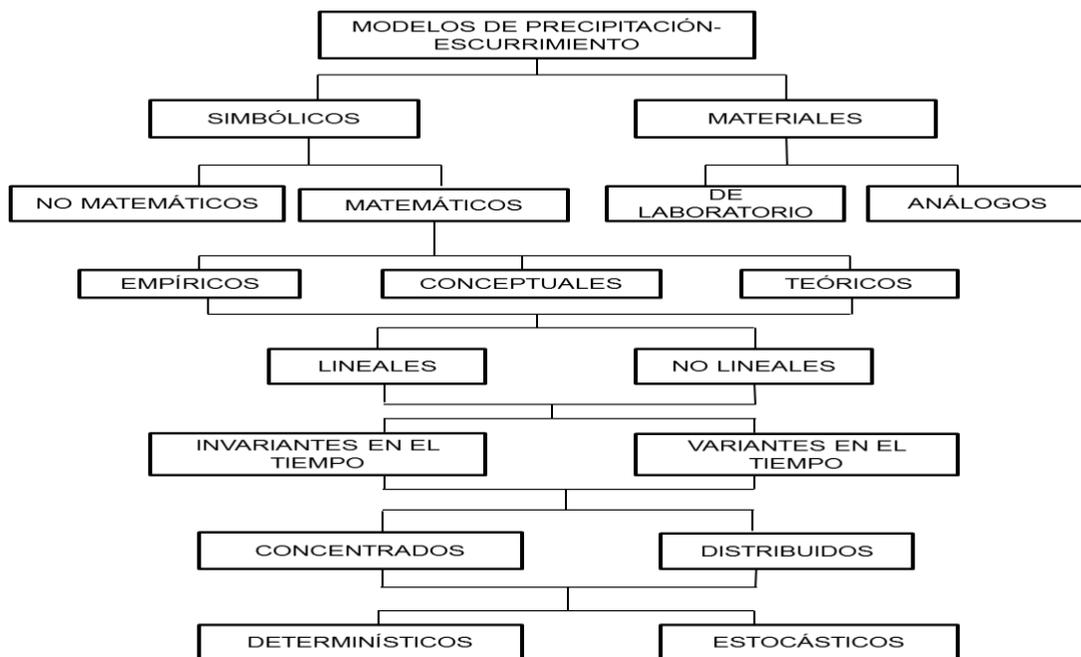


Figura 2.1. Esquema de clasificación de modelos hidrológicos. Singh, V.P., 1988.

Por muchos años, los modelos hidrológicos han sido desarrollados con diferentes características y propósitos (Jajarmizadeh *et al.*, 2012). En cuanto a su objetivo se deben distinguir entre los modelos diseñados para operación y los diseñados para planeación; en cuanto a la forma de representación espacial pueden ser agrupados en tres tipos: modelos basados en mallados

rectangulares, modelos basados en subcuencas y aquellos basados en unidades de respuesta (Plate, 2009); o como: 1) modelos de precipitación – escurrimiento para eventos; 2) modelos de precipitación – escurrimiento continuos; 3) modelos para tránsito de flujo estable; 4) modelos para flujo inestable; 5) modelos para regulación de embalses y 6) modelos para análisis de frecuencia de inundaciones. Asimismo, se mencionan a los modelos hidrológicos globales como el UMUS de Arnold *et al.* (1999) y el ISBA-MODCOU de Ledoux *et al.* (2002), así como el uso de redes neuronales artificiales y los algoritmos genéticos entre los más notables adelantos a inicios del presente siglo (Singh y Woolhiser, 2002).

2.4. Desempeño de los modelos

En cuanto al desempeño de los modelos Khakbaz *et al.* (2009) mencionan que mientras en teoría se espera que los distribuidos superen a sus contrapartes concentrados, la realidad muestra resultados heterogéneos. Beven (1989) y Grayson *et al.* (1992) concluyen que los modelos distribuidos, cuando se comparan a los concentrados, en ocasiones aportan solo ligeramente mejores, si no igual o aún peores simulaciones de avenidas. Reed *et al.* (2004), reportan los resultados de una comparación entre modelos distribuidos y concentrados concluyendo que “...los modelos concentrados superan a los modelos distribuidos en más ocasiones que los distribuidos a los concentrados”.

2.5. Modelos hidrológicos vigentes

En el cuadro 2.1 se muestra una serie de modelos donde se aprecia la diversidad de los mismos, obtenidos de las publicaciones de Singh y Woolhiser (2002), Edsel *et al.* (2011), de Texas A&M University and U.S. Bureau (2015) y de revisión propia. Aunque es solo una muestra de la gran cantidad de modelos existentes se incluyeron los más representativos y que, preferentemente,

sean de acceso público. En la última columna se agregaron las páginas web desde las cuales se pueden descargar los modelos, todas consultadas en abril del 2015.

Cuadro 2.1. Modelos lluvia-escorrimento vigentes.

MODELO	COMPONENTES	ACCESO	PAGINA WEB
HSPF (Hydrological Simulation Program- Fortran)	Escorrimientos, calidad del agua, simulación en áreas permeables e impermeables.	Público	water.usgs.gov/ software/HSPF/
USDAHL (USDA Hydrograph Laboratory)	Modelo concentrado para la simulación de eventos.	Público	http://babel.hathitrust.org/cgi/ pt?id=uva.x030378420;view= 1up;seq=3
USGS-PRMS (USGS- Precipitation Runoff Modeling System)	Modelo para simulación continua y por eventos.	Público	http://wwwbrr.cr.usgs.gov/pro jects/SW_MoWS/PRMS.html
TAUDEM (Terrain Analysis Using Digital Elevation Models)	Modelo para análisis hidro- lógico.	Público	hydrology.usu.edu/ taudem/taudem5/ downloads.html

Cuadro 2.1. (Continuación)

HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center- Hydrologic Modeling System)	Modelo semidistribuido para simulación de eventos.	Público	http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/downloads.aspx
RORB	Modelo concentrado para simulación de eventos.	Público	eng.monash.edu.au/civil/research/centres/water/rorb
SWMM (Storm Water Management Model)	Modelo semidistribuido para simulación continua.	Público	http://www2.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm#downloads
MD_SWMS (Multidimensio- nal Surface Water Modeling System)	Sistema para modelación multidimensional de agua superficial.	Público	http://iric.org/en/downloads.htm
TOP MODEL	Modelo distribuido para simulación continua.	Público	http://www.lancaster.ac.uk/lec/

Cuadro 2.1. (Continuación)

MIKE-SHE (Mike-Systeme Hydrologique Europee)	Modelo distribuido para simulación continua de flujo superficial y subterráneo.	Privado	www.mikebydhi.com/download/mike-by-dhi-2014/mike-she
ARNO	Modelo semidistribuido para simulación continua.	Público	http://www.researchgate.net/publication/222499511_The_ARNO_rainfallrunoff_model
WAT FLOOD	Modelo semidistribuido para simulación continua.	Público	www.civil.uwaterloo.ca/watflood/downloads/watflood_downloads.htm
SHETRAN (Systeme Hydrologique Europee-Transport)	Modelo distribuido para simular cantidad y calidad de agua.	Público	research.ncl.ac.uk/shetran/Downloads.php
SWAT (Soil and Water Management Tool)	Modelo distribuido para simulación continua.	Público	swat.tamu.edu

Cuadro 2.1. (Continuación)

HYDRO	Modelo distribuido	Público	https://hydrotel.codeplex.com/
TEL	para simulación continua.		releases
ANSWERS 2000 (Areal Nonpoint	Modelo distribuido para simular	Público	ww2.bse.vt.edu/ANSWERS/Download.php
Source	escurrimientos,		
Watershed	infiltración, nutrientes		
Environment	y contaminantes.		
Response			
Simulation)			
AGNPS	Modelo distribuido	Público	www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detailfull/national/water/?cid=stelprdb1043535
(Agricultural	para simular		
Non-Point Source	escurrimientos,		
Pollution Model)	infiltración, erosión y contaminantes.		
Ann-	Modelo distribuido	Público	www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detailfull/national/water/?cid=stelprdb1043535
AGNPS	para simular transporte de sedimentos, nutrientes y pesticidas.		

Cuadro 2.1. (Continuación)

GSSHA-	Modelo distribuido	Privado	www.aquaveo.com/software/
CASC2D	para simular humedad	(versión	wms-gssha
(GSSHA-	del suelo,	gratuita de	
Cascade of	tránsito de canales,	prueba de	
planes, 2-	erosión y transporte	14 días)	
Dimensional)	de sedimentos.		
KINEROS	Modelo distribuido	Público	www.tucson.ars.ag.gov/kineros
2 (Kinematic	para simular flujo		/
Runoff and	superficial, tránsito		
Erosion Model	de canales,		
2)	sedimentos,		
	infiltración y erosión.		
AGWA	La herramienta	Público	http://www.epa.gov/esd/land-
(Automated	AGWA es una		sci/agwa/
Geospatial	interfaz para		
Watershed	automatizar la		
Assessment)	parametrización y		
	ejecución de		
	SWAT y		
	KINEROS2.		

Cuadro 2.1. (Continuación)

WEPP (Water Erosion Prediction Project)	Modelo distribuido para simular flujo superficial, balance de agua, crecimiento vegetal, erosión, entre otros.	Público	www.ars.usda.gov/ News/docs.htm? docid=10621
HBV (Hydrologiska Byråns Vattenbalansavd elning)	Modelo concentrado para simulación continua.	Público	http://www.geo.uzh.ch/en/unit s/h2k/services/hbv-model
EPIC y APEX 1 (Environme ntal Policy Integrated Climate- Agricultural Policy/Envir on-mental eXtender Model)	Modelo para sistemas de cultivos y productividad del suelo- Modelo para tránsito de agua, sedimentos, nutrientes y pesticidas.	Público	epicapex.tamu.edu/model- executables/

Cuadro 2.1. (Continuación)

CEQUEAU (Centre Québécois des Sciences de l'Eau)	Modelo distribuido para simulación continua.	Público	ete.inrs.ca/ete/publications/cequeau-hydrological-model
LASCAM (Large-Scale Catchment Model)	Modelo para pre- decir el impacto de uso del suelo y del cambio climatico.	Privado	www.cwr.uwa.edu.au/software1/downloads/login/login.php
SAFRAN-ISBA- MODCOU (SAFRAN- Interaction sol- biosphère- atmosphère- MODCOU)	Modelos para análisis de variables atmosféricas, intercambio de energía e hidrología.	Público	www.cnrm.meteo.fr/spip.php?article424&lang=fr
DHSVM (Distributed Hydrology Soil Vegetation Model)	Modelo distribuido para cuencas grandes.	Público	www.hydro.washington.edu/Lettenmaier/Models/DHSVM/

Cuadro 2.1. (Continuación)

DWSM (Dynamic Watershed Simulation Model)	Modelo para simular escurrimientos y calidad del agua en eventos.	Privado	woolpert.com
SEFM (Stochastic Event Flood Model)	Modelo para simulación de eventos.	Privado	www.mgsengr.com/Dam_Safety.html
BWBM (Bochum Water Balance Model)	Modelo distribuido para simulación continua de humedad del suelo y escurrimientos.	Público	
IWFM (Integrated Water Flow Model)	Modelo concentrado para simulación continúa de agua superficial y subterránea.	Público	http://baydeltaoffice.water.ca.gov/modeling/hydrology/IWFM/

Cuadro 2.1. (Continuación)

OWLS	Modelo distribuido	Público	hydromodel.com
(Object Watershed Link Simulation)	para simulación continua de diferentes componentes del ciclo hidrológico.		
RRMT 2 (Rainfall-Runoff Modelling and Monte-Carlo Analysis Toolboxes)	Modelo lluvia-escorrentamiento en ambiente Matlab.	Público	www3.imperial.ac.uk/ewre/research/software/toolkit
HYMOD	Modelo conceptual concentrado para lluvia-escorrentamiento.	Público	https://github.com/jdherman/hymod
MPE (Modelo para Pronóstico de Escorrentimientos)	Modelo de parámetros distribuidos para el pronóstico de escorrentimientos.	Público México	http://aplicaciones.iingen.unam.mx/ConsultasSPII/Buscarchpublicacion.aspx

2.6. Situación actual y tendencias

Existen diversos ejemplos de aplicaciones de modelos hidrológicos a la solución de problemas relacionados con el manejo de agua, como el diseño del Plan Maestro de Drenaje en Denver utilizando el método racional para cuencas pequeñas y el hidrograma unitario para cuencas grandes (Guo y McKenzie, 2014); la simulación de escurrimientos en cuencas montañosas de Hawaii con el Modelo Hidrológico de Investigación del Laboratorio de Hidrología (HL-RDHM) del Servicio Nacional del Clima (Fares *et al.*, 2014); la evaluación de la cantidad y calidad del agua de escurrimiento en Sydney con un modelo basado en el enfoque de onda cinemática (Cheah *et al.*, 2008); la simulación de escurrimientos en Greenville mediante el Sistema de Modelación Modular del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS-MMS) (Shultz *et al.*, 2008); para explorar los posibles efectos del cambio climático en la cuenca Avon, UK, con los Modelos Regionales Climáticos (RCM) del UKCP09 y los proyectos ENSEMBLES (Smith *et al.*, 2014); el empleo del modelo espacialmente distribuido WetSpa en Missouri, Colorado y Oklahoma (Safari *et al.*, 2012) y la aplicación del número de curva de escurrimiento (NC) con datos satelitales de lluvia (Hong *et al.*, 2007) para estudios a nivel regional y global.

Entre los modelos más empleados resalta el Soil and Water Assessment Tool (SWAT) de Arnold *et al.* (1998), Arnold y Fohrer (2005), con diversas aplicaciones (Eckhardt y Arnold, 2001; Muleta, 2012; Moriasi *et al.*, 2007; Gassman *et al.*, 2007; Parajuli *et al.*, 2009; Knoche *et al.*, 2014); el modelo Sacramento (Hsu *et al.*, 1995; Ajami *et al.*, 2004; Moriasi *et al.*, 2007); el HEC-HMS (Chu y Steinman, 2009).

En lo referente a la base matemática para obtener la aproximación a las ecuaciones de Saint Venant en los modelos hidrológicos, en las dos últimas décadas se han empleado las ecuaciones de onda cinemática en diferentes casos y modelos (Huang y Lee, 2012; Ajami *et al.*, 2004; Chua *et al.*, 2008; Jinkang, 2007; Rai *et al.*, 2010; Mejía y Reed, 2011; Yu y Duan, 2014; Ur-Rehman,

2012; Chua y Wong, 2010; Kazezyilmaz-Alhan y Medina, 2007; Cheah *et al.*, 2008; Shultz *et al.*, 2008; Tayfur y Moramarco, 2008); así como de las ecuaciones de onda difusiva (Huang y Lee, 2012; Jain y Singh, 2005; Kazezyilmaz-Alhan y Medina, 2007; England *et al.*, 2007). Las ecuaciones de onda cinemática, como modelo hidrológico, son usadas en KINEROS2 y en HEC-HMS. El HEC-HMS las usa como una alternativa a la teoría del hidrograma unitario y como una alternativa al tránsito de avenidas en cauces.

En cuanto al aprovechamiento de nuevas tecnologías y desarrollo de técnicas novedosas se pueden mencionar el uso de sensores remotos para la estimación de lluvia (Hong *et al.*, 2007; Ajami *et al.*, 2004; Safari *et al.*, 2012; Knoche *et al.*, 2014; Yucel *et al.*, 2015; Akbari *et al.*, 2012; Khan *et al.*, 2011; Lauri *et al.*, 2014); las Redes Neuronales Artificiales (ANN) (Hsu *et al.*, 1995; Chua *et al.*, 2008; Seo *et al.*, 2015); el filtro de Kalman (Abaza *et al.*, 2014; Morales-Velázquez *et al.*, 2014); los algoritmos genéticos (Tayfur y Moramarco, 2008); los métodos de calibración automática de modelos con el algoritmo estocástico Shuffled Complex Evolution (Eckhardt y Arnold, 2001; Ajami *et al.*, 2004); los modelos 2D (Liua *et al.*, 2004; England *et al.*, 2007) y el análisis de regresión multivariada para determinar los valores K y x del método Muskingum (O'Sullivan *et al.*, 2012). La tecnología de los modelos digitales de elevación (MDE) surgió a inicios de la década de los 90^s del siglo pasado y se convirtió rápidamente en una herramienta de gran valor para obtener una mayor base física en la modelación hidrológica y lograr una mayor precisión en la simulación de escurrimientos, lo que se refleja en diversos trabajos (Zhang y Montgomery, 1994; Jain y Singh, 2005; Jinkang *et al.*, 2007; Wechsler, 2007; Akbari *et al.*, 2012). Cabe mencionar también la tecnología de los sistemas de información geográfica como herramienta esencial para la determinación de las características físicas de la cuenca y su acoplamiento con modelos hidrológicos en diversas investigaciones (Jain y Singh, 2005; Miller S.L. *et al.*, 2007; Reshma *et al.*, 2010; Yucel *et al.*, 2015) y la evolución de software

especializado como la Extensión Geoespacial para Modelación Hidrológica (HEC-GeoHMS; Fleming y Doan, 2010).

Otro tipo de estudios se han centrado en el denominado acoplamiento de modelos como el del HL-RDHM con HEC-RAS (Mejía y Reed, 2011); el de ANN con onda cinemática (Chua y Wong, 2010) así como en los estudios comparativos entre ANN, Sacramento y ARMAX (Hsu *et al.* 1995), entre el SWMM y el método MacCormack (Kazezyilmaz-Alhan y Medina, 2007); entre el AnnAGNPS y el SWAT (Parajuli *et al.*, 2009) y entre un modelo semidistribuido y otro totalmente distribuido (Knoche *et al.*, 2014).

2.7. Calibración de modelos

Calibrar un modelo significa probar que los valores que el modelo estima son iguales o muy cercanos a los datos realmente medidos y esto se logra mediante el ajuste de parámetros; una vez ajustados se comparan los resultados simulados con los observados y la calidad del ajuste se evalúa con el índice de Nash-Sutcliffe (NSE; Nash y Sutcliffe, 1970) que ha sido empleado en diversos trabajos (Moriasi *et al.*, 2007; Gupta *et al.*, 2009; Safari *et al.*, 2012; Salas-Martínez *et al.*, 2014); otros indicadores también muy usados son la raíz del cuadrado medio del error (RMSE), el coeficiente de determinación (R^2) y el error cuadrático medio (MSE). Los indicadores mencionados se calculan con las expresiones siguientes:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (Q_t^{obs} - Q_t^{sim})^2}{\sum_{t=1}^n (Q_t^{obs} - \bar{Q}^{obs})^2} \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (Q_t^{obs} - Q_t^{sim})^2} \quad (2)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{t=1}^n (Q_t^{sim} - \bar{Q}^{obs})^2}{\sum_{t=1}^n (Q_t^{obs} - \bar{Q}^{obs})^2} \quad (3)$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (Q_t^{obs} - Q_t^{sim})^2 \quad (4)$$

En dichas ecuaciones, el error medido es en función de caudales, pero desde luego que dichas expresiones son aplicables a cualquier variable hidrológica. En estas, Q^{sim} y Q^{obs} son los caudales simulados y observados en el tiempo t ; n es el número de observaciones en el periodo considerado. En el caso del coeficiente de eficiencia NSE, un valor igual a 1.0 indica un ajuste perfecto; un valor igual a 0 indica que el modelo ajusta los valores reales tanto como la media aritmética y debajo de 0, es indicador de un modelo muy malo. En el caso del R^2 , un valor de 1 indica un ajuste perfecto. En el caso del RMSE indica un error en unidades que tenga la variable hidrológica, y dicho RMSE puede dar una idea del error al compararlo con la media muestral.

2.8. Aplicaciones en México

En México, los modelos lluvia escurrimiento que más se han aplicado son el SWAT y el HEC-HMS. Aunque su utilidad es para fines diferentes, se puede decir, en general, que el SWAT modela a una escala de tiempo diaria para el número de años que elijan los modeladores y el HEC-HMS, de la manera más trabajada en México, es por evento meteorológico extremo. Algo que ha hecho que estos modelos, puestos en software, sean ampliamente usados, es que son gratuitos y se pueden encontrar fácilmente foros de usuarios compartiendo y resolviendo sus dudas. También, actualizaciones a dicho software son puestas a disposición de manera inmediata

a su liberación. Entre los primeros trabajos publicados del SWAT se encuentran el efectuado en la cuenca El Tejocote (Torres-Benites *et al.*, 2004) con el fin de evaluar la capacidad predictiva del mismo en la simulación de producción de agua, sedimentos, gastos medios y producción de maíz; así como el desarrollado en el río La Laja (Torres-Benites *et al.*, 2005), el cual solo modela la parte de balance hidrológico en la cuenca. La otra parte del SWAT que se intentó usar fue la que calcula pérdida de suelo con la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Modificada, EUPSM, (Rivera-Toral *et al.*, 2012), pero se encontró que, en esa versión de SWAT para ArcView, éste tenía limitaciones para calcular la pérdida de suelo cuando la pendiente media de la cuenca era mayor del 25%; la limitación era que presentaba errores al calcular el factor longitud de pendiente de la mencionada EUPSM. Al liberarse las versiones del SWAT para ArcGis, se notó que el error antes mencionado había sido superado, por lo que se pudo no solo usar el SWAT en las cuencas de México tanto para balance hidrológico como para pérdida de suelo, alcanzándose resultados satisfactorios al calibrarlo en la cuenca del Río Mixteco en Oaxaca (Salas-Martínez *et al.*, 2014). Sin embargo, lo que pudiera considerarse una limitación del software SWAT en nuestro país es la gran cantidad de datos que requiere, especialmente sobre las características del suelo y sobre aspectos climatológicos, los cuales no siempre están disponibles en las bases de datos que las instituciones gubernamentales tienen disponibles de manera cotidiana.

Otro modelo común en México es el del HEC-HMS, el cual ha presentado menos problemas para aplicarse en las cuencas de México. Entre los trabajos HMS, se encuentra el del río Huehuetán (Juárez *et al.*, 2009), el del río Grande (Miranda *et al.*, 2009) y el del río Escondido en el cual se utiliza la precipitación estimada por percepción remota (Magaña *et al.*, 2014). Otro modelo que inicia su uso en México es el MIKE-SHE, sin embargo, tiene la desventaja de no ser gratuito y

estar cotizado en moneda Euro. El software MIKE-SHE se aplicó en la cuenca del río La Sierra (Roblero, 2013). Otro modelo es el de Pronóstico de Escurrimiento (MPE, Domínguez *et al.*, 2008) en el río Mixcoac apoyados en radares meteorológicos (Méndez *et al.*, 2014) y en los ríos Lerma y Soto la Marina con datos satelitales de lluvia (Coutiño *et al.*, 2014) En cuanto al desarrollo de modelos encontramos al Modelo Para Pronóstico de Escurrimientos (MPE) de Domínguez *et al.*, (2008) en el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México.

2.8.1. Herramientas de Apoyo en México para modelación de escurrimientos superficiales

Entre las herramientas de apoyo en México, disponibles de forma gratuita, que permitieron dar los primeros pasos en modelar los escurrimientos sobre una cuenca, se pueden mencionar las siguientes, hechas disponibles a través del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI): modelo digital de elevación (MDE), cartas digitales edafológicas, y cartas de uso de suelo para diversos años, cubriendo todo el territorio nacional. Actualmente los MDE están disponibles para cualquier cuenca en México a través del Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM 3.0) con una resolución de 15 metros. Todas estas herramientas del INEGI están disponibles en su página oficial web. Además, actualmente, es relativamente fácil obtener imágenes de satélite LANDSAT y SPOT para el territorio Mexicano, con la finalidad de tener claridad para la definición de las diversas coberturas vegetales y uso de suelo. Las imágenes de satélite LANDSAT están disponibles de manera gratuita en un sitio web (<http://earthexplorer.usgs.gov>), y las SPOT requieren un cierto nivel de gestoría de parte de las instituciones gubernamentales para tenerlas disponibles de manera gratuita en las instituciones de enseñanza e investigación de México.

Otro tipo de información de entrada para modelar en México, es desde luego la información climatológica histórica, diaria y por evento, disponible directamente en la página web del

Servicio Meteorológico Nacional (www.smn.cna.gob.mx). La climatológica diaria histórica está disponible desde años tan remotos como 1925, para algunas estaciones, pero la climatológica por evento, esa es relativamente joven. Se pudiera decir que la climatológica por evento, reportada por la red de Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMA), se puede encontrar más o menos a partir del 2007.

Otra información importante para calibrar los modelos lluvia-escorrentamiento-sedimentos, es la información de escorrentamientos y sedimentos mensuales, e incluso hidrogramas detallados para algunas estaciones de aforo Mexicanas disponibles en el Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS), la cual se encuentra disponible gratuitamente en el sitio web de la Comisión Nacional del Agua (www.conagua.gob.mx).

Finalmente, otra herramienta muy útil, en México y en todo el mundo, ha sido el desarrollo de los sistemas de información geográfica, los cuales puestos en software como el ArcGIS, han permitido ser una plataforma para los modelos hidrológicos (ESRI, 2012).

A corto y mediano plazo en nuestro país se hace necesario emplear los recientes adelantos tecnológicos en la simulación del proceso lluvia-escorrentamiento como son: la aplicación de modelos hidrológicos distribuidos, el aprovechamiento de radares meteorológicos, la realización de estudios comparativos entre modelos, el acoplamiento de modelos, entre otros.

2.9. Conclusiones

Han transcurrido 165 años desde el desarrollo del método racional por Mulvaney y la evolución de los modelos hidrológicos así como la simulación de diversos componentes del ciclo hidrológico. Estos modelos han alcanzado un gran nivel de sofisticación, pasando por los más simples como los concentrados para eventos hasta el desarrollo de modelos distribuidos para simulaciones eventuales y continuas. Se ha llegado hasta los modelos más recientes que incorporan el uso de

redes neuronales artificiales en combinación con el apoyo de radares para obtener una evaluación más precisa de los efectos de los fenómenos meteorológicos y su influencia en el comportamiento del agua tanto superficial como subterránea. Cabe destacar la abundancia de modelos de acceso público desarrollados por diversas agencias tanto en Norteamérica como en Europa que cuentan con la capacidad de simular diversos procesos entre los que destacan el escurrimiento superficial, subsuperficial, tránsito en ríos y embalses, dinámica de nutrientes y contaminantes. Lo anterior muestra la vigencia e importancia que el uso de dichos modelos tiene para una adecuada planeación en el aprovechamiento de los recursos hídricos a nivel mundial y en nuestro país, más aún en un escenario de cambio climático global. Algo que ha condicionado cual modelo es más ampliamente usado, no es solo la fortaleza teórica-técnica del modelo, sino el que los modelos estén disponibles de forma gratuita y el que haya foros de usuario en internet en el cual se pueden exponer y solucionar los problemas más comunes encontrados al volverse usuario de un modelo en particular. En los países en desarrollo, como México, algo que condiciona la calidad de los modelos es la escasez en cantidad y calidad de datos de entrada que pueden requerir, y la cantidad y calidad de los datos medidos que están disponibles para calibrarlos. Un modelo que no es calibrado es solo una estimación de la realidad; un modelo calibrado, significa que ha pasado las pruebas de calidad de la información y puede usarse con confianza en el diseño y/o en el pronóstico del ambiente de la Ingeniería Hidrológica.

2.10. Referencias

Abaza, M., Anctil, F., Fortin, V., & Turcotte, R. (2014). Sequential streamflow assimilation for short-term hydrological ensemble forecasting. *Journal of Hydrology*. 519: 2692– 2706. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.08.038>

- Ajami, N.K., Gupta, H., Wagener, T., & Sorooshian, S. (2004). Calibration of a semi-distributed hydrologic model for streamflow estimation along a river system. *Journal of Hydrology*. 298:112–135. doi:10.1016/j.jhydrol.2004.03.033
- Akbari, A., Abu, S.A., & Othman, F. (2012). Integration of SRTM and TRMM data into the GIS-based hydrological model for the purpose of flood modeling. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*. 9:4747–4775. doi:10.5194/hessd-9-4747-2012
- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Mutiah, R.S., & Williams, J.R. (1998). Large-area hydrologic modeling and assessment: Part I. Model development. *Journal of the American Water Resources Association*. 34(1): 73-89. doi: 10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x
- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Mutiah, R. S., & Allen, P. M. (1999). Continental scale simulation of the hydrologic balance. *Journal of American Water Resources Association*. 35(5):1037–1051. doi: 10.1111/j.1752-1688.1999.tb04192.x
- Arnold, J. G., & Fohrer, N. (2005). SWAT2000: Current capabilities and research opportunities in applied watershed modeling. *Hydrological Processes*. 19(3): 563-572. doi: 10.1002/hyp.5611
- Beven, K. (1989). Changing ideas in hydrology – the case of physically-based models. *Journal of Hydrology*. 105:157–172. doi.org/10.1016/0022-1694(89)90101-7
- Cheah, C.H., Ball, J.E., & Cox, R.J. (2008). Kinematic wave modeling of surface runoff quality for small urban catchments. 11th International Conference on Urban Drainage, Edinburgh, Scotland, UK. <http://www.researchgate.net/publication/266332704>
- Chu, X., & Steinman, A. (2009). Event and Continuous Hydrologic Modeling with HEC-HMS. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 135:119-124. **DOI:** 10.1061/_ASCE_0733-9437_2009_135:1_119_

- Chua, L.H.C., & Wong, T.S.W. (2010). Improving event-based rainfall–runoff modeling using a combined artificial neural network–kinematic wave approach. *Journal of Hydrology*. 390:92–107. doi:10.1016/j.jhydrol.2010.06.037
- Chua, L.H.C., Wong, T.S.W., & Sriramula, L.K. (2008). Comparison between kinematic wave and artificial neural network models in event-based runoff simulation for an overland plane. *Journal of Hydrology*. 357:337– 348. doi:10.1016/j.jhydrol.2008.05.015
- Clarke, R. T. (1973). A review of some mathematical models used in hydrology, with observations on their calibration and use. *Journal of Hydrology*. 19:1– 20. [http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694\(73\)90089-9](http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694(73)90089-9)
- Coutiño, R. L., Breña, N. J. A., & Pedrozo, A. A. (2014). Modelación hidrológica con datos satelitales de lluvia en México. XXIII Congreso Nacional de Hidráulica. México. <http://amh.org.mx/>
- Dingman, S.L. (2002). Hydrologic Modeling (p. 25-31) *In: Physical Hydrology*. Waveland Press Inc. Long grove, Ill. USA. 646 p.
- Domínguez, M.R., Esquivel, G.R., Méndez, A.B., Mendoza, R.A., Arganis, J.M.L., & Carrizosa, E.E. (2008). Manual del Modelo para Pronóstico de Escurrimiento. Universidad Nacional Autónoma de México. http://eias. utalca.cl/isi/ publicaciones/ unam/pronostico _del_ escurrimiento.pdf
- Dooge, J.C.I. (1986). Looking for Hydrologic Laws. *Water Resources Research* 22(9): 46S-58S. Wiley, USA. DOI: 10.1029/WR022i09Sp0046S
- Eckhardt, K., & Arnold, J.G. (2001). Automatic calibration of a distributed catchment model. *Journal of Hydrology*. 251:103-109. PII:S0022-1694(01)00429-2

Edsel, B. D., Camp, J. V., LeBoeuf, E. J., Penrod, J., James P., & Abkowitz, M. D. (2011). Watershed Modeling and its Applications: A State-of-the-Art Review. *The Open Hydrology Journal*. 5: 26-50. <http://dx.doi.org/10.2174/1874378101105010026>

England Jr., J.F., Velleux, M.L., & Julien, P.Y. (2007). Two-dimensional simulations of extreme floods on a large watershed. *Journal of Hydrology*. 347: 229– 241. doi:10.1016/j.jhydrol.2007.09.034

ESRI. (2012). Software ArcGIS. Version 10.1. USA.

Fares, A., Awal, R., Michaud, J., Chu, P-S., Fares, S., Kodama, K., & Rosener, M. (2014). Rainfall-runoff modeling in a flashy tropical watershed using the distributed HL-RDHM model. *Journal of Hydrology*. 519 (D):3436-3447. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.09.042>

Fleming, M.J., & Doan, J.H. (2010). HEC-GeoHMS, Geospatial Hydrologic Modeling Extension. US Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center. <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-geohms/>

Gassman, P.W., Reyes, M.R., Green, C.H., & Arnold, J.G. (2007). The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*. 50(4):1211-1250. <http://naldc.nal.usda.gov/download/12860/PDF>

Grayson, R.B., Moore, I.D., & McMahon, T.A. (1992). Physically based hydrologic modeling: A terrain-based model for investigative purposes. *Water Resources Research*. 28:2639–2658. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/92WR01258/pdf#>

Guo, J.C.Y., & MacKenzie, K. (2014). Modeling consistency for small and large watershed studies. *Journal of Hydrologic Engineering*. 19(8):1-14. doi: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000948](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000948)

- Gupta, H.V., Kling, H., Yilmaz K.K., & Martinez, G.F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*. 377: 80–91. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>
- Hong, Y., Adler, R.F., Hossain, F., Curtis, S., & Huffman, G.J. (2007). A first approach to global runoff simulation using satellite rainfall estimation. *Water Resources Research*. 43. doi:10.1029/2006WR005739.
- Horton, R.E. (1933). The role of infiltration in the hydrologic cycle. *Transactions-American Geophysical Union*. 145:446-460. <http://dx.doi.org/10.1029/TR014i001p00446>
- Hsu, K., Gupta, H.V., & Sorooshian, S. (1995). Artificial neural network modeling of the rainfall-runoff process. *Water Resources Research*. Vol. 31(10): 2517-2530. DOI: 10.1029/95WR01955
- Huang, P., & Lee, K.T. (2012). An efficient method for DEM-based overland flow routing *Journal of Hydrology*. 489:238–245. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.03.014>
- Imbeau, M.E. (1892). La Durance: Regime, crues et inudations. *Annales des Ponts et Chauseés*. 7e serie 3(1):5-18.
- Jain, M.J., & Singh, V.P. (2005). DEM-based modelling of surface runoff using diffusion wave equation. *Journal of Hydrology*. 302:107–126. doi:10.1016/j.jhydrol.2004.06.042
- Jajarmizadeh, M., Harun, S., & Salarpour, M. (2012). A review of theoretical consideration and types of models in hydrology. *Journal of Environmental Science and Technology*. 5(5): 249-261. DOI:10.3923/jest.2012.249.261
- Jinkang, D., Shunping, X., Youpeng, X., Xu, C., & Singh, V.P. (2007). Development and testing of a simple physically-based distributed rainfall-runoff model for storm runoff simulation in humid forested basins. *Journal of Hydrology*. 336: 334– 346. doi:10.1016/j.jhydrol.2007.01.015

- Juárez-Méndez, J., Ibáñez-Castillo, L.A., Pérez-Nieto, S., & Arellano-Monterrosas, J.L.L. (2009). Uso del suelo y su efecto sobre los escurrimientos en la cuenca del río Huehuetán. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas* 1(2): 69-76. doi: 10.5154/r.inagbi.2009.07.015
- Khakbaz, B., Imam, B., Hsu, K., & Sorooshian, S. (2009). From lumped to distributed via semi-distributed: Calibration strategies for semi-distributed hydrologic models. *Journal of Hydrology*. 418-419:61-77. doi:10.1016/j.jhydrol.2009.02.021
- Kampf, S. K., & Burges, S. J. (2007). A framework for classifying and comparing distributed hillslope and catchment hydrologic models. *Water Resources Research*. 43. doi:10.1029/2006WR005370
- Kazezyilmaz-Alhan, C.M., & Medina, M.A. (2007). Kinematic and diffusion waves: Analytical and numerical solutions to overland and channel flow. *Journal of Hydraulic Engineering*. 133(2). DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2007)133:2(217)
- Khan, S.I., Hong, Y., Wang, J., Yilmaz, K.K., Gourley, J.J., Adler, R.F., Irwin, D. (2011). Satellite remote sensing and hydrologic modeling for flood inundation mapping in Lake Victoria Basin: Implications for Hydrologic Prediction in Ungauged Basins. *Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 49(1):85-95. DOI: 10.1109/TGRS.2010.2057513
- Knapp, H., Dorgonoblu, A., & Ortel, T.W. (1991). A review of rainfall-runoff modeling for stormwater management. Illinois State Water Survey Report 516. Champaign, Ill. 96 p. <http://www.isws.illinois.edu/pubdoc/CR/ISWSCR-516.pdf>
- Knoche, M., Fischer, C., Pohl, E., Krause, P., & Merz, R. (2014). Combined uncertainty of hydrological model complexity and satellite-based forcing data evaluated in two data-scarce semi-arid catchments in Ethiopia. *Journal of Hydrology*. 519: 2049–2066. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.10.003>

Lauri, H., Räsänen, T.A., & Kummu, M. (2014). Using reanalysis and remotely sensed temperature and precipitation data for hydrological modeling in Monsoon Climate: Mekong River Case Study. *Journal of Hydrometeorology*. 15: 1532:1545. DOI: 10.1175/JHM-D-13-084.1

Ledoux, E., Etchevers, P., Golaz, C., Habets, F., Noilhan, J., & Voirin, S. (2002). Chapter 8: Regional simulation of the water budget and riverflows with ISBA-MODCOU coupled model: Application to the Adour and Rhone basins.” *Mathematical models of large watershed hydrology*”. V. P. Singh and D. K. Frevert, eds. Water Resources Publications.

Liu, Q.Q., Chen, L., Lia, J.C., & Singh, V.P. (2004). Two-dimensional kinematic wave model of overland-flow. *Journal of Hydrology*. 291: 28–41. doi:10.1016/j.jhydrol.2003.12.023

Magaña H. F., Khalidou, M.B., & Guerra, C.B.H. (2014). Estimación de caudales máximos utilizando precipitación estimada por percepción remota. XXIII Congreso Nacional de Hidráulica. México. <http://amh.org.mx/documentos/>

Mejia, A.I., & Reed, S.M. (2011). Evaluating the effects of parameterized cross section shapes and simplified routing with a coupled distributed hydrologic and hydraulic model. *Journal of Hydrology*. 409:512–524. doi:10.1016/j.jhydrol.2011.08.050

Méndez-Antonio, B., Soto-Cortés, G., Rivera-Trejo, F., & Caetano, E. (2014). Modelación hidrológica distribuida apoyada en radares meteorológicos. *Tecnología y Ciencias del Agua*. 5(1): 83-101.
http://www.researchgate.net/publication/261798195_Modelacin_Hidrolgica_Distribuida_apoyada_en_radares_meteorologicos

Miller, S.N., Semmens, D.J., Goodrich, D.C., Hernandez, M., Miller, R.C., Kepner, W.G., & Guertin, D.P. (2007). The Automated Geospatial Watershed Assessment Tool. *Environmental Modelling & Software* 22:365-377. http://www.epa.gov/esd/land-sci/agwa/pdf/agwa_tool_web.pdf

- Miranda-Aragón, L., Ibáñez-Castillo, L.A., Valdez-Lazalde, J.R., & Hernández-de la Rosa, P. (2009). Modelación hidrológica empírica del gasto de 100 años de periodo de retorno del río Grande, Tlalchapa, Guerrero en dos escenarios de uso del suelo. *Agrociencia*. 43:333-344. <http://www.colpos.mx/agrocien/Bimestral/2009/may-jun/may-jun-09.html>
- Morales-Velázquez, M.I., Aparicio, J., & Valdes, J.B. (2014). Pronóstico de avenidas utilizando el filtro de Kalman discreto. *Tecnología y Ciencias del Agua*. 5(2):85-110. <http://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v5n2/v5n2a6.pdf>
- Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D., & Veith, T.L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*. 50(3): 885–900. <http://naldc.nal.usda.gov/download/9298/PDF>
- Muleta, M.K. (2012). Model performance sensitivity to objective function during automated calibrations. *Journal of Hydrologic Engineering*. 17 (6):756-767. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000497](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000497)
- Mulvany, T.J. (1850). On the use of self-registering rain and flood gauges. *Proceedings of The Institution of Civil Engineers*. 4(2):1-8.
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J.V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology*. 10:282–290. [http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- O’Sullivan, J.J., Ahilan S., & Bruen, M. (2012). A modified Muskingum routing approach for floodplain flows: Theory and practice. *Journal of Hydrology*. 470–471:239–254. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.09.007>

Parajuli, P.B., Nelson, N.O., Frees, L.D., & Mankin, K.R. (2009). Comparison of AnnAGNPS and SWAT model simulation results in USDA-CEAP agricultural watersheds in south-central Kansas. *Hydrological Processes*. 23:748–763. doi: 10.1002/hyp.7174

Plate, E. (2009). Classification of hydrological models for flood management. *Hydrology and Earth System Sciences*. 13:1939–1951. www.hydrol-earth-syst-sci.net/13/1939/2009/

Ponce, V. M. (1994). Ch. 13. Catchment Modeling (p. 389-451) *In* Engineering Hydrology: Principles and Practices. Ed. Prentice-Hall. 640 p.

Rai, R.K., Upadhyay, A., & Singh, V.P. (2010). Effect of variable roughness on runoff. *Journal of Hydrology*. 382:115–127. doi:10.1016/j.jhydrol.2009.12.022

Reed, S., Koren, V., Smith, M., Zhang, Z., Moreda, F., & Seo, D.J. (2004). Overall distributed model intercomparison project results. *Journal of Hydrology*. 29(1–4):27–60. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.03.031>

Refsgaard, J. (2007). Hydrological modeling and river basin management. Doctoral Thesis. University of Copenhagen. 96 p. http://www.geus.dk/program-areas/water/denmark/rappporter/geus_special_rap_1_2007.pdf. Consultado Marzo 7, 2015.

Reshma, T., Kumar, P.S., Babu, R.K., & Kumar, K.S. (2010). Simulation of runoff in watersheds using SCS-CN and Muskingum-Cunge methods using remote sensing and geographical information systems. *International Journal of Advanced Science and Technology*. 25:31-42. <http://www.sersc.org/journals/IJAST/vol25/4.pdf>

Rivera-Toral, F., Pérez-Nieto, S., Ibáñez-Castillo, L.A., & Hernández-Saucedo, F.R. (2012). Aplicabilidad del Modelo SWAT para la Estimación de la Erosión Hídrica en las Cuencas de México. *Agrociencia* 46: 101-105. <http://www.colpos.mx/agrocien/Bimestral/2012/feb-mar/feb-mar-12.html>

- Roblero, H.R. (2013). Modelación hidrometeorológica de áreas con riesgo de inundación en la cuenca del río La Sierra, en los estados Chiapas y Tabasco, México. Tesis de maestro en ciencias. Colegio de Postgraduados. www.biblio.colpos.mx:8080/.../Roblero_Hidalgo_R_MC_Hidrociencias_
- Safari, A., De Smedt, F., & Moreda, F. (2012). WetSpa model application in the Distributed Model Intercomparison Project (DMIP2). *Journal of Hydrology*. 418–419:78–89. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.04.001>
- Salas-Martínez, R., Ibáñez-Castillo, L.A., Arteaga-Ramírez, R., Martínez-Menes M.R., & Fernández Reynoso, D.S. (2014). Modelado Hidrológico de la cuenca del Río Mixteco en el Estado de Oaxaca, México. *Agrociencia* 48 (1): 1-15. <http://www.colpos.mx/agrocien/Bimestral/2014/ene-feb/ene-feb-14.html>
- Seo, Y., Kim, S., Kisi, O., & Singh, V.P. (2015). Daily water level forecasting using wavelet decomposition and artificial intelligence techniques. *Journal of Hydrology*. 520:224–243. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.11.050>
- Sherman, L. K. (1932). Streamflow from Rainfall by the Unit Graph Method. *Engineering News Record*. 108: 501-505.
- Shultz, M.J., Crosby, E.C., & McEnery, J.A. (2008). Kinematic wave technique applied to hydrologic distributed modeling using stationary storm events: an application to synthetic rectangular basins and an actual watershed. *Hydrology Days 2008*. Colorado State University. http://hydrologydays.colostate.edu/papers_2008/shultz_paper.pdf
- Singh, V.P. (1988). *Hydrologic Systems*. Volume 1: Rainfall-runoff modelling. Prentice Hall, New Jersey.
- Singh, V. P., & Woolhiser, D. A. (2002). Mathematical modeling of watershed hydrology. *Journal of Hydrologic Engineering*. 7(4):270-292. DOI: 10.1061/(ASCE)1084-0699(2002)7:4(270)

Smith, A., Freer, J., Bates, P., & Sampson, C. (2014). Comparing ensemble projections of flooding against flood estimation by continuous simulation. *Journal of Hydrology*. 511:205–219.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.01.045>

Tayfur, G., & Moramarco, T. (2008). Predicting hourly-based flow discharge hydrographs from level data using genetic algorithms. *Journal of Hydrology*. 352: 77– 93.
doi:10.1016/j.jhydrol.2007.12.029

Texas A&M University and U.S. Bureau of Reclamation. (2015). Hydrologic Modeling Inventory Website: <http://hydrologicmodels.tamu.edu/models.htm>. Consultado el 3 de Marzo del 2015. Sitio web administrado por Vijay P. Singh and Donald K. Frevert. College Station, TX, USA.

Todini, E. (1988). Rainfall runoff modelling: Past, present and future. *Journal of Hydrology*. 100: 341–352. DOI: 10.1016/0022-1694(88)90191-6

Torres-Benites, E., Fernández-Reynoso, D.S., Oropeza-Mota, J.L., & Mejía-Saenz, E. (2004). Calibración del modelo hidrológico SWAT en la cuenca “El Tejocote”, Atlacomulco, Estado de México. *Terra Latinoamericana*. 22(4):437-444. <http://www.chapingo.mx/terra/contenido/22/4/437.pdf>

Torres-Benites, E., Mejía-Sáenz, E., Cortés-Becerra, J., Palacios-Vélez, E., & Exebio-García, A. (2005). Adaptación de un modelo de simulación hidrológica a la cuenca del río Laja, Guanajuato, México. *Agrociencia*. 39:481-490. <http://www.colpos.mx/agrocien/Bimestral/2005/sep-oct/sep-oct-05.html>

Ur-Rehman, A. S. (2012). Hydrologic analysis of a semi-arid watershed using kinematic wave and SCS flow models. Ph.D. Thesis; Michigan State University. <http://etd.lib.msu.edu/islandora/object/etd%3A688/datastream/OBJ/view>

- Xu, C. (2002). Hydrologic Models. Uppsala University, Department of Earth Sciences. 168p.http://www.soil.tubs.de/lehre/Master.Unsicherheiten/2012/Lit/Hydrology_textbook.pdf
- Yu, C., & Duan, J.G. (2014). High Resolution numerical schemes for solving kinematic wave equation. *Journal of Hydrology*. 519 (A):823-832. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.08.003>
- Yucel I., Onen A., Yilmaz K.K., & Gochis D.J. (2015). Calibration and evaluation of a flood forecasting system: Utility of numerical weather prediction model, data assimilation and satellite-based rainfall. *Journal of Hydrology* 523:49–66. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.01.042>
- Wechsler, S.P. (2007). Uncertainties associated with digital elevation models for hydrologic applications: a review. *Hydrology and Earth System Sciences*. 11:1481–1500. www.hydrol-earth-syst-sci.net/11/1481/2007/
- Zhang, W., & Montgomery, D.R. (1994). Digital elevation model grid size, landscape representation and hydrologic simulations. *Water Resources Research*. 30(4):1019-1028. DOI: 10.1029/93WR03553

CAPÍTULO 3

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. La cuenca Lerma - Santiago

De acuerdo con Sepúlveda (2009) el Lerma (figura 3.1) es el río más largo de México. Se origina en los manantiales de Almoloya del Río, en el estado de México, y atraviesa hacia el noroeste del Valle de Toluca, formando parte del sistema Lerma-Chapala-Santiago, que descarga en el océano Pacífico. Desde sus orígenes en la Laguna de Almoloya hasta el Lago de Chapala, el cauce principal es el río Lerma, de allí hasta la desembocadura al océano Pacífico, el colector principal es el río Santiago; esta cuenca abarca parcialmente el territorio de nueve entidades federativas: Estado de México, Michoacán, Querétaro, Guanajuato, Jalisco, Aguascalientes, Zacatecas, Durango y Nayarit, incluyendo las cuencas cerradas de Pátzcuaro, Cuitzeo y Sayula-San Marcos. Con una extensión superficial de 132 mil 724 kilómetros cuadrados, representa cerca del 7 por ciento del territorio nacional.



Figura 3.1. Estados que comprende la cuenca Lerma – Santiago (Sepúlveda, 2009).

3.1.1. Región río Lerma-Salamanca

Drena una superficie correspondiente a la zona centro y sur del estado (figura 3.2). Tiene su origen en la presa Solís en donde recibe las aguas de las subcuena Presa Solís-Salamanca y forma la conocida Bifurcación del Lerma; comprende además los afluentes del centro de la entidad, Salamanca-Río Angulo, arroyo Temazcatío y Río Guanajuato-Silao. Dentro de esta subcuena se localizan dos de los cuatro almacenamientos más importantes del estado que son: la presa la Purísima y la presa La Gavia. Además recibe las aguas del Río Turbio-Presa Palote, Río Turbio-Manuel Doblado, donde se originan el cauce del Río Turbio y finalmente Río Turbio-Corralejo.



Figura 3.2. Regiones hidrológicas en Guanajuato (<http://mapserver.inegi.gob.mx/geografía/español/estados/gto>)

3.1.2. La subcuenca del río Turbio

De acuerdo con Martínez y García (2007) La Subcuenca del río Turbio tiene una extensión de poco más de 4 000 km². Se localiza en el extremo occidental del estado de Guanajuato, en los límites con el estado de Jalisco. En el norte de la Subcuenca se hallan la Sierra de Guanajuato y la ciudad de León; su límite sur lo constituye el río Lerma, en las cercanías de las localidades de Pénjamo y Abasolo. Esta subcuenca es una de las que sufren uno de los mayores niveles de explotación de agua subterránea a escala nacional y alberga también a una de las mayores densidades de pozos en todo el país. El abatimiento de los mantos acuíferos es constante y gradual, con un ritmo de 1 a 3 m anuales en varias zonas de la subcuenca.

Por su parte, la Dirección de Protección Civil del estado de Guanajuato reporta que el área de la cuenca del Río Turbio es de 4,818 km² de los cuales 3,228 km² (67%) corresponden al Estado de Guanajuato y 1,590 km² (33%) al estado de Jalisco. Asimismo indica que la Cuenca del Río Turbio está situada en la parte poniente del estado de Guanajuato, entre los paralelos 20° 18' y 21° 19' latitud norte y los meridianos 101° 26' y 102° 17' longitud oeste; colinda con los estados de Guanajuato y Jalisco y está delimitada al Noroeste con la cuenca del Río Santiago, al Este con la cuenca del Río Guanajuato-Silao y al Sur y Sureste, con la cuenca directa del Río Lerma (<http://proteccioncivil.guanajuato.gob.mx>).

3.1.2.1. Fisiografía

Hernández-Silva *et al.*, (2005) indican que la subcuenca se encuentra dentro de la provincia fisiográfica del Eje Neovolcánico Transmexicano. Dentro de ésta, se ubica la subprovincia conocida como Bajío Guanajuatense que ocupa gran parte del sur del Estado de Guanajuato.

El río Turbio tiene sus orígenes en la sierra de valles paralelos de la sierra de Guanajuato, así como en la sierra de Comanja relacionada con las mesetas de lavas de los Altos de Jalisco. También los escurrimientos que fluyen desde el oeste hacia el Turbio tienen su origen en esta misma zona de mesetas. Esta es una geoforma que, aunque ubicada dentro de la provincia del Eje Neovolcánico, es en sí, una subprovincia distinta al Bajío Guanajuatense. Además, existe una serie de escurrimientos procedentes del este del curso medio del río Turbio, que nacen en los lomeríos asociados a mesetas y lomeríos aislados. Otras zonas elevadas, donde se encuentran afluentes del río Turbio, son la sierra de Pénjamo, el cerro del Veinte y el cerro de Huanímaro.

Los ríos Los Gómez, León y la parte baja del Santiago, se localizan dentro de la llanura de aluviones profundos. A partir del lugar donde el río recibe el nombre de Turbio, comienza un cambio en las llanuras. Estas se vuelven pantanosas debido a que se encuentran dentro de la topoforma de llanuras con tobas a poca profundidad. Las llanuras de aluviones profundos constituyen el área más baja, plana y predominante de todo El Bajío guanajuatense. Se observa al sur de León pero también aparece en el último tramo del río Turbio cerca de su confluencia con el río Lerma. Existen en estas llanuras suelos profundos que suelen tener en algunas partes varios metros de profundidad. Las llanuras con toba a poca profundidad se localizan en el curso medio del río Turbio; consisten en suelos arcillosos de poca profundidad sobre una toba, generalmente menor a los 50 cm.

Las mesetas de lavas se encuentran dentro de la subprovincia de los Altos de Jalisco e incluyen a la sierra de Comanja. Aunque esta topoforma se encuentra en la provincia del Eje Neovolcánico se incluye en este trabajo, por encontrarse en ella, gran parte de las cabeceras de los arroyos que alimentan el río Turbio. Se trata de derrames de lavas que han sido erosionados y que se encuentran cortados por cañadas. Estas mesetas se unen a las cumbres abruptas de la

sierra de Pénjamo que alcanza 2,500 m de altura; se distinguen por tener hacia El Bajío una bajada abrupta y cóncava. Se observa una variedad de suelos como son Planosoles mólicos, asociados a Feozem háplico y Vertisoles pélicos con fase pedregosa y dúrica. Las sierras de laderas tendidas están presentes sólo en el cerro del Veinte. Los lomeríos asociados a mesetas se localizan al este del curso medio del Turbio; son los lomeríos de calizas al norte y sur de Jesús del Monte y más al sur, lomeríos y mesetas de rocas ígneas (SPP, 1980).

3.1.2.2. Clima

La cuenca tiene algunas variaciones climáticas. De acuerdo a la clasificación de Köppen modificada por García (1981), la ciudad de León y su zona circundante poseen un clima BS hw(w)(e)g; es decir, un clima seco el menos seco de los BS. La precipitación se presenta predominantemente en verano; la invernal representa sólo el 5% de la anual. La temperatura media anual es 19.2°C; el mes más frío (enero) es inferior a 18°C; por lo tanto, el clima se considera semicálido y extremo (e); las temperaturas más altas se presentan antes del solsticio de verano (g).

Otro clima representativo es el de las partes bajas; se clasifica como (A)C(w₀)(w)a(e)g, representado por los datos climáticos de ciudad. Manuel Doblado. Este clima es semicálido, (A)C; se trata del más cálido de los templados C, con temperatura media anual mayor de 18°C y la del más frío, menor a 18°C. Para esta estación, la temperatura media anual y la media del mes más frío es de 20.5°C y 15.9°C respectivamente. El cociente P/T es de 35.24, menor al valor especificado como límite máximo (43.2) de un clima subhúmedo con lluvias de verano (w₀)(w); por lo tanto éste es el más seco de los climas semicálidos. La lluvia invernal es menor a 5% del total de la lluvia anual. Se trata de un clima con verano cálido, puesto que el mes más cálido es de 24.5°C; ocasionalmente, se convierte en clima extremo ya que la oscilación anual de

temperatura media mensual es de 8.6°C; es un clima gangético ya que la temperatura media mensual más alta ocurre antes del solsticio de verano. El tercer tipo de clima común en la cuenca es el C(w₀)(w); esto es, el más seco de los climas templados con lluvias de verano. Ocurre generalmente en las elevaciones superiores a 1850 m al norte y este de León, en los Altos de Jalisco y en las elevaciones de El Bajío, donde se observan temperaturas medias anuales menores a 18°C. La mayor parte de la cuenca del río Turbio se encuentra entre las isoyetas de 600 a 800 mm de precipitación anual.

3.1.2.3. Hidrología

El Río Turbio es un afluente derecho del Río Lerma figurando entre los más importantes de la cuenca alta del mismo; tiene su origen en la Sierra Cuatralba a unos 20 km al norte de la ciudad de León, con el nombre de Arroyo La Patiña, uniéndose por la margen izquierda los arroyos Los Castillos, Ibarrilla, Ojo de Agua de Los Reyes, Alfaro y El Salto; por la margen derecha confluye el Arroyo Mariches, todos ellos dentro y en las inmediaciones de la Ciudad de León por la parte este, en este tramo el colector principal se conoce como Río de los Gómez. Posteriormente se le une por la margen derecha el Río Santiago (Río Pedrito), en el Municipio de San Francisco del Rincón, a la altura de las comunidades de San Bernardo.

En el Municipio de Purísima del Rincón el río se bifurca en el sitio que se ubica la carretera El Maguey-Manuel Doblado, por el centro escurre tanto por el Río Las Conchas (conocido como Isabelota) como por su cauce natural, volviendo a ser un solo cauce hasta el poblado Maravillas en el Municipio de Manuel Doblado, en este punto el río retoma la dirección norte-sur hasta Las Adjuntas en el Municipio de Manuel Doblado, en este tramo confluyen por la margen derecha el Arroyo Jalpa y otros de menor importancia; a la altura de Las Adjuntas por la margen derecha confluye el Río Colorado, a partir de este punto el Río Turbio cambia su rumbo al oeste-este hasta

7 km, al noreste de la Ciudad de Cuernámaro donde vuelve a tomar la dirección norte-sur. Aproximadamente 45 km, aguas abajo confluyen, por la margen izquierda el Arroyo Seco y por la margen derecha el Río Pénjamo, finalmente el Río Turbio llega su confluencia con el Río Lerma a 2 km aguas arriba de la población llamada La Calle, en el Municipio de Pénjamo, después de un recorrido de aproximadamente 223 km como (<http://proteccioncivil.guanajuato.gob.mx>). Dicho recorrido se muestra en la figura 3.3.

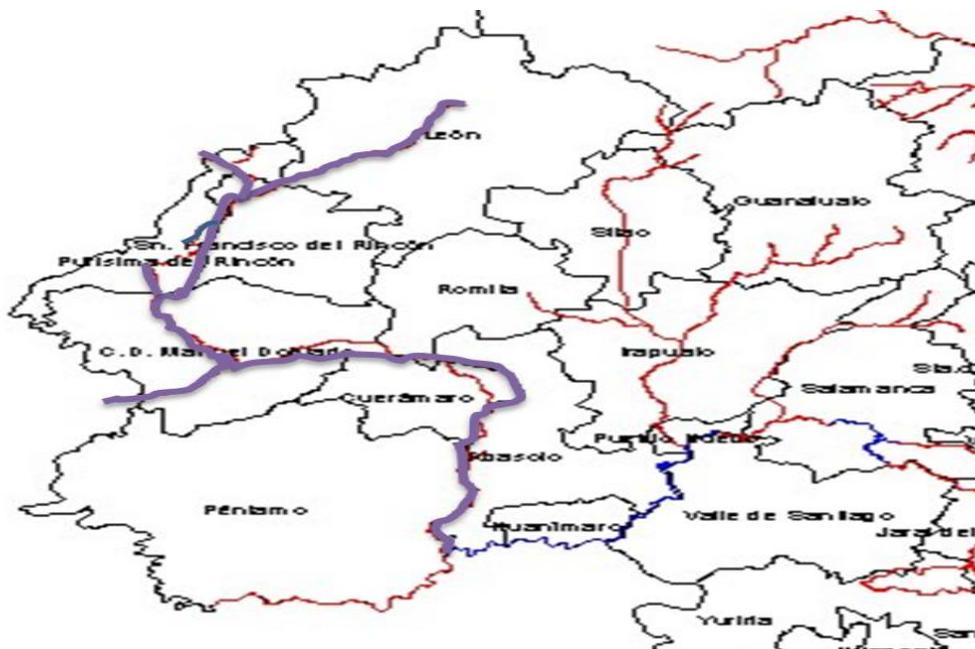


Figura 3.3. El Río Turbio y los municipios que cruza en el estado de Guanajuato. (CEAG)

Los orígenes del río Turbio son los escurrimientos de una serie de corrientes que proceden de la serranía, al norte de la ciudad de León. Esta serranía tiene varios nombres locales, pero en forma general, se denomina sierra de Comanja. Los arroyos, enumerados de este a oeste, son: Alfaro, El Hueso, Saltillo, Hondo, Ojo de Agua, Los reyes, El Muerto, Ibarrilla, La India, Los Castillos, El Calvillo, rincón Los Caballos, Hacienda de Arriba y Chichingas. Estos cuatro últimos arroyos alimentan la presa El Palote, que se encuentra al norte de León. Esta desagua en la

continuación del arroyo Hacienda de Arriba que recibe las aguas del arroyo Los Castillos del lado este, y del oeste, las del arroyo Mariche, para así formar el río Los Gómez que cruza la ciudad de León y continua su curso hacia el suroeste, recibiendo agua de algunos arroyos como La Joya, Campo Verde, La Mora y La Venta. Después de la presa San Germán, el río Los Gómez recibe el nombre de río León. En las cercanías de San Francisco del rincón baja una serie de arroyos: Soto, Hondo, las Cruces, Malpaso, Chamácuaro, La Mesita, Atarjea, Primavera y otros, procedentes de la sierra de Comanja. Estos forman el río Santiago ya dentro del municipio de San Francisco del Rincón, que a su vez se une al río León; a partir de aquí, se llama río Santiago. Después de pasar junto a la población de San Bernardo, el río Santiago cambia de nombre y se convierte en el río Turbio. Recibe a varios arroyos procedentes del oeste de los Altos de Jalisco como son: el arroyo de Jalpa, La Cañada y Presa Vieja.

El río Turbio también recibe escurrimientos de una región de mesetas y colinas situadas al este del valle, como el arroyo Coyote que se pierde en las lagunas de las partes bajas. Esta región situada al este del río Turbio también tiene escurrimiento hacia el noreste, por medio del arroyo Sauz de Armenta; o bien, los arroyos que se forman cerca de La Muralla, que conducen sus aguas hacia el este, donde se localiza el río La Llave, escurrimientos que se pierden en El Bajío. Los pocos escurrimientos de estas mesetas y colinas, con dirección sureste, se unen a presas que desaguan hacia el río Turbio. Dentro de los municipios Manuel Doblado y Cuerámaro, recibe durante la época de lluvias las aguas de arroyos que se originan en los Altos de Jalisco y en la sierra de Pénjamo.

Se ha tratado de mejorar el drenaje de esta zona, creando una serie de represas como La Alberca (también conocida como Tres Villas), el Coyote, Corralejo y otras de menor importancia. Toda la cuenca del río Turbio se caracteriza por tener un sinnúmero de presas, además de lagunas naturales, como es la Ciénega de Enmedio. En la parte montañosa, cercana a León, las presas

sirven para el control de avenidas, además de retener agua para el consumo de las poblaciones de la región, usos industriales y para riego. En ciertos casos, las presas en El Bajío se convierten en verdaderas lagunas de depósito de sólidos provenientes de la industria de la comarca, como es el caso de las presas La Maestranza y San Germán. Algunas ya se han azolvado y sus vasos sirven de áreas de cultivo, como es el caso de la presa La Trinidad.

Después de recibir las aguas de arroyo Seco, el río Turbio recibe como afluentes a los arroyos Magallanes, Prieto, Pénjamo, todos procedentes de la sierra de Pénjamo; además, recibe las aguas de algunos canales como Maravillas, Varal y el desagüe de la presa San Fernando, que se encuentra en el municipio de Pénjamo para, finalmente, penetrar al río Lerma, a dos kilómetros de la población de La Calle.

3.1.2.4. Tipos y uso del suelo

En lo que se conoce como llanuras de aluviones profundos del río Turbio, predominan los Vertisoles pélicos, con altos contenidos de arcilla expandible asociados a Faeozems háplicos. En las llanuras con tobas a poca profundidad, predominan los Planosoles y Vertisoles con fase salina. Las sierras con cumbres escarpadas consisten principalmente, en Litosoles y Faeozems háplicos o lúvicos con fase lítica. En las mesetas lávicas, se encuentran Planosoles mólicos, asociados a Faeozems háplicos y Vertisoles pélicos con fase pedregosa y dúrica. En las sierras de laderas tendidas, los suelos predominantes son los Vertisoles pélicos y Faeozems háplicos con fase pedregosa. En los lomeríos asociados a mesetas, existen Vertisoles pélicos asociados a Faeozems háplicos con fase pedregosa (SPP, 1980).

Los grandes grupos de suelos que predominan en la zona de estudio son los Vertisoles pélicos, en algunas partes con fases líticas profundas y, en menor proporción, los Castañozems lúvicos y Chernozems lúvicos, desarrollados sobre areniscas y conglomerados del Terciario Granular

Indiferenciado. El cuadro 3.1 muestra los tipos de suelo existentes en la cuenca, determinados con ArcGis a partir de cartografía de INEGI.

Cuadro 3.1. Tipos de suelo y texturas en la cuenca del río Turbio.

Tipo de suelo	Superficie (km²)	Superficie (%)	Texturas	Superficie (km²)	Superficie (%)
Chernozem	6.60	0.20	Gruesa	356.74	10.8
Leptosol	137.48	4.17	Media	1089.23	33.1
Luvisol	21.55	0.65	Fina	1844.41	56.1
Lixisol	33.19	1.00			
Andosol	152.63	4.63			
Phaeozem	875.24	26.59			
Planosol	326.39	9.91			
Regosol	219.26	6.66			
Vertisol	1518.02	46.13			
TOTALES	3290.36	99.94		3290.38	100

Fuente: elaboración propia con cartografía de INEGI en ArcGis.

En el cuadro 3.2 se presenta la superficie en km² y en porcentaje de uso del suelo en la cuenca, destacando la agricultura con una superficie total de 1374.45 km² (137,445 ha)

Cuadro 3.2. Uso del suelo en la cuenca del río Turbio.

Uso	Superficie (km²)	Superficie (%)
Agricultura de riego	502.70	15.27
Agricultura de temporal	871.75	26.49
Bosque de encino	208.47	6.33
Chaparral	3.80	0.11
Matorral crasicaule	47.19	1.43
Matorral subtropical	500.12	15.19
Pastizal cultivado	223.00	6.77
Pastizal natural	252.54	7.67
Pastizal-huizachal	624.17	18.96
Zona urbana	56.62	1.72
TOTALES	3290.36	99.94

Fuente: elaboración propia con cartografía de INEGI en ArcGis.

3.1.2.5. Vegetación

La vegetación natural de mayor importancia en el área es la de matorral subtropical; este tipo de vegetación debió de haber ocupado extensiones muy amplias en épocas prehispánicas. En la actualidad, el matorral subtropical existe sólo como islotes en zonas con pendientes suaves dentro de El Bajío. Su presencia se observa en la sierra de Comanja, en los Altos de Jalisco y en elevaciones, al este del curso medio del río Turbio y en el cerro del Veinte. El matorral subtropical tiene en el estrato superior, cactáceas, particularmente nopal (*Opuntia* sp.), órgano

(*Zemairocereus* sp.), huizaches (*acacia* sp.), mezquites (*Prosopis laevigata*) y cazahuate (*ipomoea* sp.). El estrato medio lo conforman arbustos de huizaches (*acacia* sp.) y uña de gato (*Mimosa* sp.). El estrato inferior lo dominan los pastizales y otras plantas pequeñas como son *Bouteloua* sp., *aristida* sp., *Chloris* sp. y *eragrostis* sp. También existen relictos de mezquiales como los que se encuentran cerca de la presas El Coyote y La Alberca. Estos son verdaderos bosques de mezquites en los que puede haber cazahuate y nopal en el estrato medio y en el inferior, *Bouteloua* sp., *aristida* sp. e *hilaria* sp. La vegetación natural de bosques de encino se observa en las sierras Cuatralba y Pénjamo y en zonas pequeñas y aisladas de los Altos de Jalisco, donde incluso puede haber asociaciones de bosques de encino y pino. (Hernández Silva *et al.*, 2005).

3.1.2.6. Características del área de estudio

Hasta la estación hidrométrica Las Adjuntas (clave 12391, figura 3.4) localizada en las coordenadas 101°50'40''O y 20°40'32''N, la cuenca comprende una superficie de 3290.4 km² con una pendiente promedio de 9.06%. El cauce principal tiene una longitud de 117.5 km hasta la estación hidrométrica, con una pendiente media de 0.0057 (m/m) y un tiempo de concentración estimado de 19 h con el método de Kirpich (Aparicio, 2012). Sus tributarios principales son (a) el río Pedrito con una longitud de 66.2 km y una pendiente media de 0.003, (b) el río Jalpa con una longitud de 82 km y una pendiente media de 0.0018 y, (c) el río Colorado con 46.2 km de longitud y una pendiente media de 0.0067. En estos cauces y en otros de dimensiones menores se han establecido una cantidad considerable de presas con fines de riego y control de avenidas, entre las más importantes se pueden mencionar: las presas Peña Blanca y El Barrial en el río Pedrito, Jalpa Nueva y el Sauz en el río Jalpa, San Antonio y Ciénega de Galvanes en el río Colorado, El Palote en la ciudad de León y Cañada de Negros en el municipio de Purísima del Rincón.

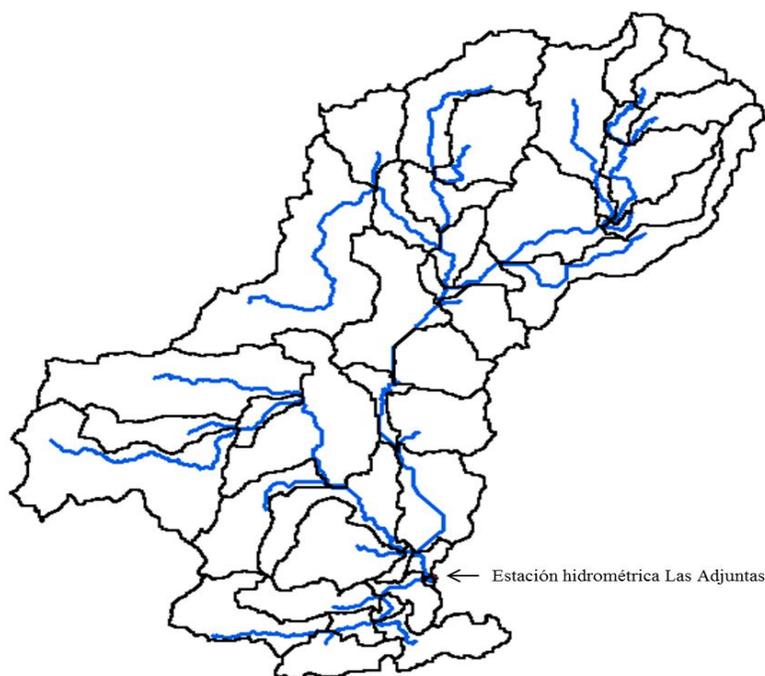


Figura 3.4. La cuenca del río Turbio hasta la estación hidrométrica Las Adjuntas.

3.1.2.7. Población

De manera general, la población en el área de estudio era de 1,662,637 habitantes en el año 2010; 811,307 hombres y 851,330 mujeres distribuida de acuerdo al cuadro 3.3. En la parte correspondiente al estado de Guanajuato se concentraba el 99 % de la misma, ya que en el estado de Jalisco la única población de tamaño considerable es San Diego de Alejandría, con 6,647 habitantes.

Cuadro 3.3. Población en la cuenca del río Turbio

	TOTAL	MASCULINO	FEMENINO
Manuel Doblado	37145	17546	19599
León	1436480	701781	734699
Purísima del Rincón	68795	33782	35013
San Francisco del Rincón	113570	55026	58544
San Diego de Alejandría	6647	3172	3475
	1662637	811307	851330

Censo General de Población y Vivienda 2010, INEGI.

3.2. Metodología

A continuación se describen las diferentes etapas del proyecto de investigación, enumerándolas en forma secuencial desde la recopilación de información hasta la calibración del modelo para obtener los hidrogramas requeridos.

1. Obtención de la información necesaria para alimentar el modelo. Se revisaron documentos previos referidos a la cuenca del río Turbio para obtener un primer acercamiento a las condiciones físicas de la misma. Se definieron las estaciones meteorológicas convencionales y automáticas así como la hidrométrica que son de utilidad para los fines de la investigación. Una vez definidas, se identificó una tormenta significativa con información del Banco Nacional de Aguas Superficiales (BANDAS). En base a la fecha de ocurrencia de la misma, se obtuvieron los datos de precipitación en las estaciones convencionales mediante el Extractor Rápido de Información Climática (ERIC) y se solicitó a la Comisión Estatal del Agua de Guanajuato (CEAG) los datos de precipitación en la misma fecha de tres estaciones automáticas administradas por dicho organismo.
2. Obtención del Modelo Digital de Elevación (MDE) de la página WEB del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Se realizó la descarga del Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0) el cual proporciona una resolución de 15m y posteriormente se efectuó el recorte del área de estudio por coordenadas geográficas con el programa ArcGis 10.1.
3. Delimitación de la cuenca y sus características fisiográficas con la extensión HEC-GeoHMS para ArcGis. Para lo anterior y con fines de calibración, se definió la salida de la cuenca en la estación hidrométrica Las Adjuntas la cual cuenta con datos de hidrometría desde la década de los 40^s del siglo pasado. La cuenca fue delimitada siguiendo el ejemplo proporcionado en el capítulo 13 del manual para Hec-GeoHMS 10.1; con este proceso, se obtienen las características físicas de la cuenca y se genera el modelo de cuenca para exportarlo a HEC-HMS.
4. Recorridos de campo para obtener información de secciones transversales en corrientes así como tipos y uso de suelo. Una vez obtenido el modelo de cuenca y dado que la simulación con el modelo de onda cinemática requiere de datos de campo, se obtuvieron en campo las secciones transversales de las principales corrientes y se tomó información

de vegetación, cultivos y tipos de suelo para tenerlos como base al momento de calibrar parámetros como el número de curva de escurrimiento (CN). Asimismo, se visitaron diversas presas al interior de la cuenca para conocer las condiciones de funcionamiento actuales.

5. Simulación del proceso lluvia-escurrimiento con el Software HEC-HMS en la cuenca ya delimitada. Al contar con la información necesaria, el modelo fue alimentado y con fines de comparación se realizaron tres simulaciones: escurrimientos en ladera con el método del hidrograma unitario del Servicio de Conservación de Suelos y en corrientes con el método de Muskingum; en ladera con onda cinemática y en corrientes con Muskingum; con onda cinemática tanto en laderas como en corrientes.
6. Calibración y validación del modelo. Una vez realizadas las simulaciones, se procedió a calibrar con el fin de obtener el mejor ajuste entre los hidrogramas simulados y el medido en la estación hidrométrica Las adjuntas.
7. Análisis estadístico de los resultados. Se obtuvo el índice de Nash en las tres simulaciones para determinar cuál de las tres propuestas proporciona un mejor ajuste.

En la figura 3.5 se muestra un diagrama que indica las etapas a desarrollar en la computadora personal, una vez que se cuenta con toda la información meteorológica e hidrométrica.

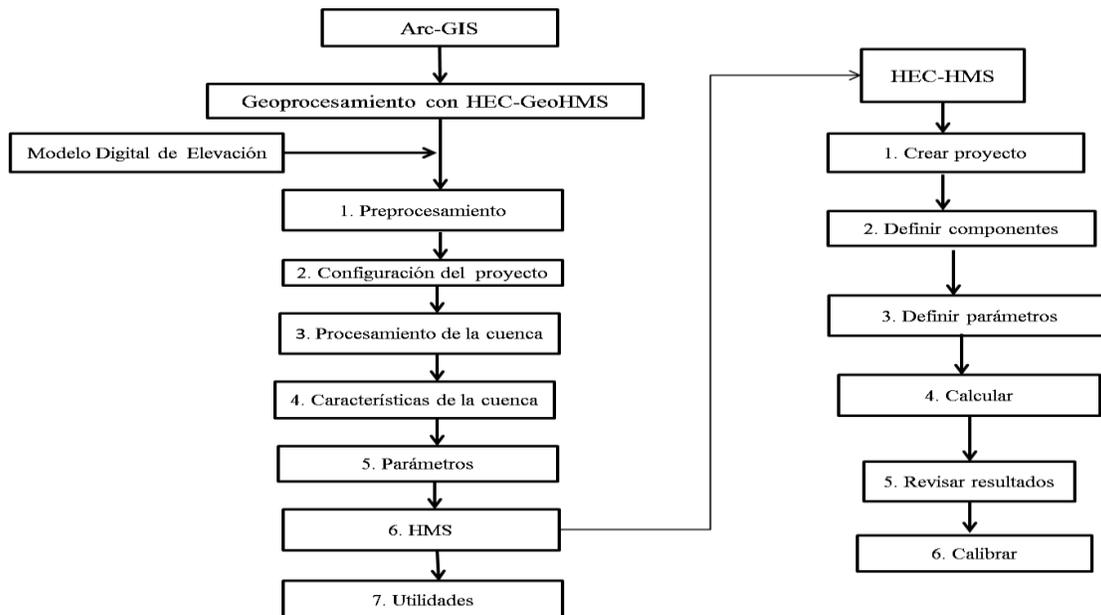


Figura 3.5. Diagrama de flujo del proceso de simulación.

3.3. Referencias

Aparicio, M.J. (2012). Fundamentos de hidrología de superficie. Limusa.

García, E. 2004. Modificaciones al Sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía. UNAM.

Hernández -Silva, G.; Solorio-Munguía, J.G.; Maples-VerMeersch, S.; Morales-Vasallo, L.; Flores-Delgadillo, S.; Hernández-Santiago, D.; Solís-Valdéz, S.; Hernández-Anguiano, M.E.; Alcala-Martínez, J.R. (2005). Monitoreo de contaminantes en las cuencas de los ríos Guanajuato, San Juan de Otates y Turbio y su impacto en el río Lerma, estado de Guanajuato, México. Boletín 112. Instituto de Geología, UNAM.

<http://proteccioncivil.guanajuato.gob.mx>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2010). Censo General de Población y vivienda.

Martínez, M.P.; García, M.M. (2007). Distribución de Iones Mayores y Metales en el agua de la Subcuenca del río Turbio G12-B69 estados de Guanajuato y Jalisco. Revista Geociencia. 1(1):37-54.

Sepúlveda, V.L. (2009). La cuenca en datos. lagacetaUdeG No.568.

http://gaceta.udg.mx/G_notas1.php?id=5107

Secretaría de Programación y Presupuesto. (1980). Síntesis Geográfica del Estado de Guanajuato.

Coordinación General de los Servicios Nacionales de Estadística, Geografía e Informática.

CAPÍTULO 4

MODELO HIDROLÓGICO DE ONDA CINEMÁTICA DE LA CUENCA DEL RÍO

TURBIO, GUANAJUATO, MÉXICO³

Gregorio Vargas Castañeda, Laura Alicia Ibáñez Castillo, Ramón Arteaga Ramírez, Gustavo Arévalo Galarza

RESUMEN

Se presentan los métodos que usualmente se han empleado en México para simular el proceso de conversión de lámina de lluvia a lámina escurrida, de lámina escurrida a hidrograma, el tránsito de avenidas en cauces y el tránsito de avenidas en presas. Lo anterior incluye los métodos del número de curva de escurrimiento (CN), hidrograma unitario (HU) sintético del SCS, tránsito en cauces con el método de Muskingum, y el tránsito de avenidas en vasos. Asimismo, se presenta la teoría de la onda cinemática dentro de los métodos disponibles en el sistema de modelación hidrológica del centro de ingeniería hidrológica (HEC-HMS) del ejército de los Estados Unidos como alternativa a: (1) el HU del SCS y (2) del tránsito de avenidas en cauces con el método de Muskingum. Para fines comparativos se ejecutaron modelos hidrológicos con tres combinaciones: (1) HU-Muskingum, (2) Onda cinemática-Muskingum, y (3) Onda cinemática-Onda cinemática. De acuerdo al índice de eficiencia de Nash (NSE), el mejor modelo hidrológico, por evento, para la cuenca del Río Turbio fue la combinación onda cinemática-Muskingum, en donde la lámina escurrida se convierte en hidrograma a través de la onda cinemática y el tránsito de avenidas en cauces se ejecuta con Muskingum. Los resultados peores fueron para la combinación onda cinemática-onda cinemática, es decir tanto la transformación de lámina escurrida a hidrograma como el tránsito de avenidas en cauces, se ejecutan con la onda

³ Enviado el 29 de julio del 2015 a la revista Tecnología y Ciencias del Agua, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

cinemática. El modelo hidrológico aquí presentado es por eventos, y pudiera ser implementado en un sistema de alerta temprana de inundaciones.

Palabras clave: lluvia-escorrentamiento, onda cinemática, hidrograma unitario, modelo para alerta de inundaciones.

ABSTRACT

In this paper is presented a review of the methods that are commonly used in Mexico to simulate the processes involved in the conversion of rainfall depth to runoff depth, from runoff depth to hydrograph, river routing, and, reservoir routing. The earlier include the runoff curve number (CN), synthetic unit hydrograph (UH) of SCS, river routing with Muskingum, and, reservoir routing. Additionally is presented the kinematic wave theory available in the hydrologic modeling of the Hydrologic Engineering Center (HEC-HMS) from the USACE as an alternative to: (1) the UH of SCS, and, (2) the Muskingum river routing. Three combinations of hydrologic models were compared: (1) UH-Muskingum, (2) Kinematic wave-Muskingum, and, (3) Kinematic wave-kinematic wave. According to the Nash-Sutcliffe Efficiency Index (NSE), the best hydrologic model, by event, for the Turbio watershed, was the combination kinematic wave-Muskingum, i.e., the runoff depth is converted to hydrograph through the kinematic wave and the river routing is performed with Muskingum method. The worst results were produced where the conversion of runoff depth to hydrograph and the routing river, both, were performed with the kinematic wave. The hydrological model presented here is by event, and, this could be implemented in an early flooding forecast alert.

Keywords: rainfall-runoff, kinematic wave, unit hydrograph, model for flooding warning system.

4.1. Introducción

Uno de los principales usos de un modelo lluvia-escorrentamiento es el pronóstico de escorrentamientos para apoyar la implementación de un sistema de alerta de inundaciones. Un modelo típico lluvia-escorrentamiento para ejecutarse en el HEC-HMS, puede ser descrito en base a la experiencia generada en diversos trabajos. La serie de pasos a ejecutar son (USACE, 2000; Juárez-Méndez *et al.*, 2010; Miranda-Aragón *et al.*, 2009): (1) Convertir la lámina de lluvia en lámina de escorrentamiento, con el número de curva de escorrentamiento, (2) La lámina escurrida convertirla en hidrograma, con el hidrograma unitario (HU) del extinto US Soil Conservation Service, (3) transitar el hidrograma de la avenida a través de un cauce con el método de Muskingum, y, (4) transitar el hidrograma de la avenida a través de una presa con la ecuación de continuidad, es decir, un balance de volúmenes. En este trabajo se presenta una metodología alternativa que implica usar la teoría de la onda cinemática; se plantea como hipótesis que ésta puede incrementar la precisión del modelo lluvia-escorrentamiento. Esta metodología alternativa implicaría que: (1) en lugar de usar la teoría del hidrograma unitario, en cualquiera de sus modalidades, emplear la onda cinemática, y, (2) que, en lugar del tránsito de avenidas con Muskingum, usar la teoría de la onda cinemática. Desde luego que la metodología de realizar el tránsito de avenidas a través de un cauce resolviendo las ecuaciones completas de Saint-Venant, es más preciso, pero resulta poco práctico ir a campo a realizar los levantamientos batimétricos de cada una de las secciones transversales, desde un cauce pequeño hasta uno grande.

4.2. Consideraciones teóricas en una simulación hidrológica superficial tradicional

En este trabajo se considera una modelación hidrológica superficial tradicional, en el ámbito del software HEC-HMS, para México, al hecho de considerar: (a) al número de curva de

escurrimiento, (b) el hidrograma unitario del SCS, y, (c) el tránsito de avenidas en cauces con el método de Muskingum.

4.2.1. El número de curva de escurrimiento

El par de ecuaciones usualmente planteadas para estimar la lámina escurrida en el sistema internacional (en mm) es:

$$Q = \frac{(P - 0.2 S)^2}{P - 0.8 S} \quad (1)$$

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (2)$$

Donde P =lámina precipitada en mm; Q = lámina de escurrimiento directo en mm; y S = potencial máximo de retención o infiltración; CN = número de curva de escurrimiento, adimensional. El valor de CN usualmente se obtiene de tablas donde su valor depende del grupo hidrológico de suelo, uso de suelo, práctica de manejo de suelo y la densidad de cobertura vegetal (condición hidrológica). Dicho valor de CN puede ser corregido por la lluvia ocurrida los 5 días anteriores y la pendiente media de la cuenca. El par de ecuaciones (1) y (2) puede ser usada para láminas precipitadas P en 24 horas, para un evento, o para un lapso de tiempo , Δt , de un hietograma de una tormenta.

La ecuación (1) fue originalmente planteada de la siguiente manera:

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad (3)$$

Donde I_a = abstracción inicial en mm; la versión actual del método SCS-CN establece que $I_a = \lambda S$; y actualmente se supone que $\lambda = 0.2$ para aplicaciones prácticas usuales. Como el

componente de la abstracción inicial toma en cuenta: el almacenamiento superficial, la interceptación y la infiltración antes de que inicie el escurrimiento, diversos autores han reportado valores de λ entre 0.1 y 0.3. En este trabajo se realiza esta aclaración ya que el valor de dicha abstracción inicial pudiera ser usado en el momento de calibrar un modelo hidrológico basado en el concepto curva numérica de escurrimiento.

4.2.2. Hidrograma unitario adimensional del Servicio de Conservación de Suelos

El hidrograma de flujo para una cuenca puede ser simulado usando un hidrograma unitario (UH), definido como el hidrograma de escurrimiento directo de una tormenta que produce una pulgada de lluvia exceso; aunque en el sistema internacional, la lámina unitaria del UH puede ser 1 mm o 1 cm (Aparicio, 2012). La lluvia exceso o directa es la porción de la lluvia total que fluye superficialmente en forma directa a las corrientes, después de la interceptación por la vegetación y la infiltración en la superficie del suelo. Dado que el UH no cambia en forma y representa la respuesta en caudal a una lámina unitaria (pulgada o milímetro o centímetro), de lluvia exceso en una cuenca, los hidrogramas de flujo para tormentas actuales se simulan multiplicando las ordenadas de la descarga de un HU por la lluvia exceso calculada del registro de la lluvia observada (Weaver, 2003).

McCuen (2005) evaluó los HU de un gran número de cuencas y resultaron adimensionales al dividir las descargas (q) por el gasto pico (q_p) y las ordenadas del tiempo (t) por el tiempo al pico (t_p); al promediarlos obtuvo el HU con una forma curvilínea. El tiempo base (t_b) del HU adimensional es aproximadamente cinco veces t_p y aproximadamente $3/8$ del volumen total ocurre antes de t_p ; el punto de inflexión de la curva descendente ocurre aproximadamente 1.7 veces el t_p . El HU curvilíneo puede ser aproximado por un HU triangular que tiene

características similares (Figura 1). En ésta se observa que mientras el t_b del HU triangular es solo $8/3$ del t_p , el área bajo la curva ascendente de los dos HU es la misma (37.5%).

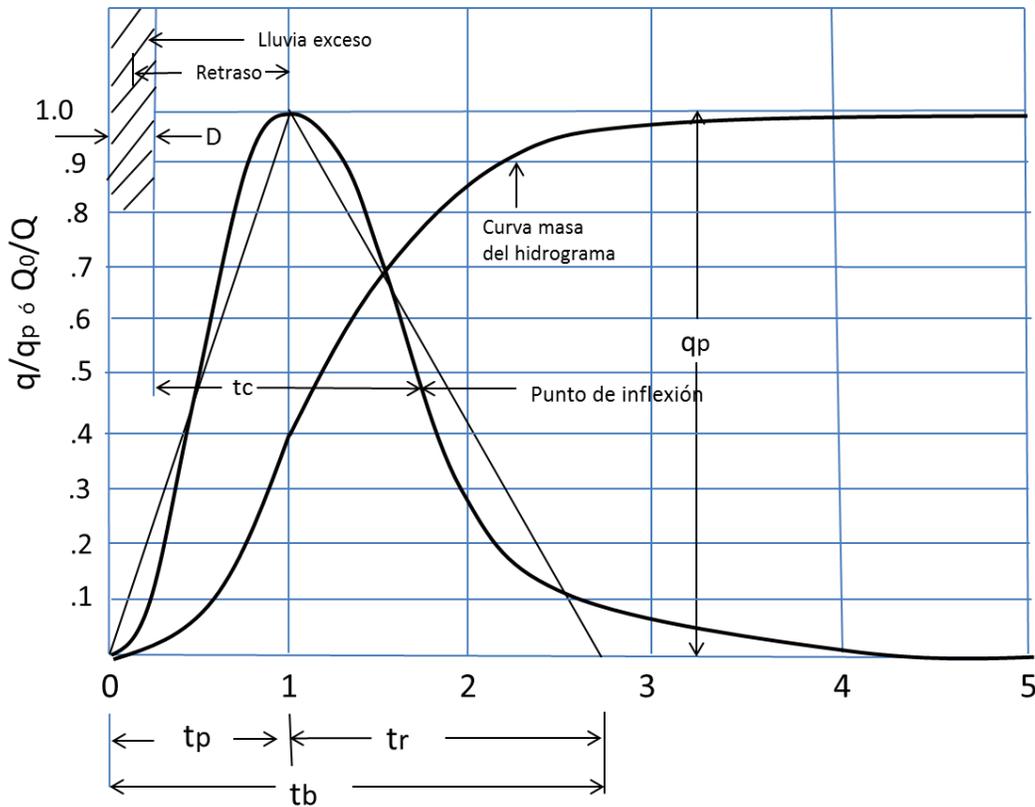


Figura 4.1. Hidrograma unitario adimensional e hidrograma unitario triangular equivalente (McCuen, 2005).

Mockus (1949), USDA(2004) y McCuen (2005) describen y explican los componentes del HU en los siguientes términos: tiempo al pico (t_p), es el tiempo desde el inicio de la porción ascendente a la ocurrencia del q_p . El t_p se determina por las características del drenaje tales como: la densidad, pendiente, rugosidad de las corrientes y características de infiltración del suelo. La distribución de la lluvia también lo afecta. Tiempo de concentración (t_c), es el tiempo requerido por el agua para viajar desde el punto hidráulicamente más remoto en la cuenca hasta la salida de la misma. Para tormentas de muy larga duración, el tiempo de concentración se asocia con el

tiempo requerido por el sistema para alcanzar la descarga máxima o de equilibrio. Las características del drenaje como longitud y pendiente, junto con las características hidráulicas de las corrientes, determinan el tiempo de concentración. Tiempo de retraso, es el tiempo entre el centro de masa del hietograma de precipitación efectiva y el centro de masa del hidrograma de escurrimiento directo. Tiempo base (t_b), es la duración del hidrograma de escurrimiento directo.

4.2.3. Tránsito hidrológico de avenidas en cauces con el método de Muskingum

El método Muskingum para tránsito de avenidas (McCarthy, 1938), basado en una relación simple de almacenamiento – descarga en sistemas fluviales, es extensamente empleado en ingeniería de ríos (Gill, 1979). El método tiene un mejor desempeño en ríos donde los efectos inerciales y las influencias del remanso son pequeños y donde los parámetros del modelo son elegidos apropiadamente para representar el comportamiento del sistema (Chang *et al.*, 1983). El modelo lineal de Muskingum utiliza relaciones de continuidad y almacenamiento expresadas como:

a) Continuidad:

$$\frac{dS_t}{dt} = I_t - O_t \quad (4)$$

b) Almacenamiento:

$$S_t = K[xI_t + (1 - x)O_t] \quad (5)$$

Donde S_t , I_t y O_t son cantidades simultáneas de almacenamiento, ingresos y salidas, respectivamente, en un tiempo dado t , K es una constante de almacenamiento que expresa la relación entre almacenamiento y descarga en una corriente y x es un factor adimensional de ponderación que varía entre 0 y 0.5 para corrientes naturales. Este factor de ponderación describe

la importancia relativa de las entradas y salidas en el almacenamiento. La constante temporal de almacenamiento, K , es casi equivalente al tiempo de viaje de la avenida a través de la corriente (McCuen, 2005). Si K y x son conocidos, el tránsito se efectúa con:

$$O_t = C_1 I_t + C_2 I_{t-\Delta t} + C_3 O_{t-\Delta t} \quad (6)$$

En la cual, C_1 , C_2 y C_3 son coeficientes de tránsito dados por:

$$C_1 = \frac{0.5\Delta t - Kx}{(1-x)K + 0.5\Delta t} \quad (7)$$

$$C_2 = \frac{Kx + 0.5\Delta t}{(1-x)K + 0.5\Delta t} \quad (8)$$

$$C_3 = \frac{-0.5\Delta t + (1-x)K}{(1-x)K + 0.5\Delta t} \quad (9)$$

Donde los parámetros K y x , son los mismos que en la ecuación (5), además Δt es el tiempo – paso, $I_{t-\Delta t}$ y $O_{t-\Delta t}$ son las descargas de entrada y salida en el tiempo $t - \Delta t$. Una vez que los coeficientes C , los cuales suman la unidad, son determinados, la ecuación (6) se emplea repetidamente para determinar las descargas de salida, O_t , en cualquier momento (O’Sullivan *et al.*, 2012).

Scharffenberg y Fleming (2010) indican que la K de Muskingum es esencialmente el tiempo de viaje a través de la corriente. K se estima con las propiedades de la sección transversal y del caudal. En algunos casos puede ser un parámetro a calibrar. La x de Muskingum es la ponderación de la influencia de las entradas y las salidas; varía entre 0.0 y 0.5. En aplicaciones prácticas, un valor de 0.0 representa la máxima atenuación y el 0.5 indica ausencia de atenuación.

Raudkivi (1979) menciona que el parámetro K tiene unidades de tiempo y su valor es aproximadamente igual al tiempo de viaje de pico de la avenida a lo largo del tramo:

$$K = \frac{L}{w} \quad (10)$$

Donde L es la longitud del tramo y w es la velocidad promedio del pico de la avenida; w puede estimarse en relación con la velocidad media del agua v como:

$$w = 1.5v \quad (11)$$

En términos muy generales se puede decir que x se aproxima a 0.0 en cauces muy caudalosos y de pendiente pequeña, y a 0.5 en caso contrario. A falta de otros datos, es recomendable tomar $x=0.2$ como un valor medio (Aparicio 2012).

4.2.4. Tránsito de avenidas en presas

De acuerdo con Aparicio (2012) el tránsito de avenidas en vasos es un procedimiento que sirve para determinar el hidrograma de salida de una presa dado un hidrograma de entrada.

En el tránsito de avenidas en vasos se usa, como en la simulación del funcionamiento de vasos, la ecuación de continuidad en su forma de diferencias finitas:

$$\frac{I_i + I_{i+1}}{2} - \frac{O_i + O_{i+1}}{2} = \frac{V_{i+1} - V_i}{\Delta t} \quad (12)$$

Donde I es el gasto de entrada al vaso y O es el gasto de salida del mismo. Los subíndices i e $i+1$ denotan valores al inicio y al final del intervalo de tránsito, respectivamente.

4.3. La teoría de la onda cinemática en un modelo lluvia-escurrencimiento

Desde su desarrollo por Lighthill y Witham (1955a, 1955b) la teoría de la onda cinemática (OC) ha sido ampliamente utilizada en ciencias ambientales y del agua. Pasaron cerca de 15 años antes

de que fuera aceptada como un concepto científico para modelar una variedad de procesos hidrológicos. Ejemplos de su aplicación incluyen el flujo superficial y en corrientes, flujo base, flujo no saturado, flujo en macroporos, flujo en surcos y bordos, hidráulica de ríos, movimiento de glaciares, erosión y transporte de sedimentos, transporte de solutos, transporte microbiano y cromatográfico, entre otros. Dichas aplicaciones se emplean en diversas ramas de la hidrología entre las que se incluyen la hidrología superficial, hidrología de zona vadosa, hidrología fluvial y costera, irrigación, hidrología subsuperficial y de calidad del agua (Singh, 2001).

El modelo de onda cinemática se basa en las ecuaciones de onda cinemática y es utilizado ampliamente en la modelación lluvia - escurrimiento. Es un modelo de base física y emplea parámetros físicos para caracterizar una cuenca. El modelo de onda cinemática toma la lluvia neta, i_n , como entrada y predice q (o y). Como tal, también requiere abstracciones como entrada para el hidrograma que será simulado. Debido a que no es posible determinar las abstracciones a priori, la lluvia neta para simular el evento se determina en base a la tasa de abstracción del evento de calibración (Chua *et al.*, 2008).

La Aproximación de Onda Cinemática (AOC) es una simplificación de las ecuaciones de conservación de masa y momentum, donde el gradiente principal es la pendiente superficial. De acuerdo a Singh (2002), la AOC es una representación apropiada de los procesos en la cuenca para un amplio espectro de condiciones. Considerando que las condiciones iniciales y de frontera son difíciles de especificar para las ondas difusiva y dinámica, la AOC es una base atractiva para la modelación hidrológica. En la AOC, la ecuación de momentum se simplifica al asumir que el gradiente en el fondo (del escurrimiento superficial o en corriente) es igual al gradiente de fricción. Por su parte Vieux *et al.*, (2004) mencionan que una relación de fricción totalmente turbulenta tal como la ecuación de Chezy o Manning, en combinación con la ecuación de continuidad forman la AOC.

Miller (1984) presenta las derivaciones completas de las ecuaciones de continuidad y movimiento aplicadas a la modelación de escurrimientos con onda cinemática de las cuales se muestran los resultados finales:

De continuidad:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (13)$$

De movimiento:

$$g \frac{\partial y}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial t} = g(S_0 - S_f) \quad (14)$$

Donde Q es la descarga, A es el área de sección transversal, t es el tiempo, x es la distancia horizontal, y es el tirante, v es la velocidad del flujo, g es la aceleración gravitacional, S_0 es la pendiente del fondo y S_f es la pendiente de fricción. La ecuación (14) es la forma unidimensional de la ecuación de movimiento que describe el flujo no permanente en canales abiertos sin afluencia lateral.

Para aplicar la teoría de onda cinemática, se asume que la onda superficial es larga y plana por lo que la pendiente de fricción es aproximadamente igual a la pendiente del fondo. Entonces, los términos restantes de la ecuación (14), también llamados términos secundarios, se asumen como despreciables. Esto implica que hay un balance entre las fuerzas gravitacionales y las de fricción.

La ecuación resultante es:

$$0 = g(S_0 - S_f) \quad (15)$$

$$S_0 = S_f \quad (16)$$

El modelo de onda cinemática se denomina así porque está basado en la ecuación de continuidad y solo aproxima la ecuación dinámica con una ecuación de flujo uniforme. Definiendo la pendiente de fricción con la fórmula de flujo uniforme, la ecuación (16) puede ser representada para aplicarse a una corriente específica o a un plano de flujo superficial por una relación de la forma:

$$Q = \alpha A^m \quad (17)$$

En la cual α y m son coeficientes definidos para cada sección transversal. Usualmente, en una aplicación de la teoría de onda cinemática las ecuaciones (13) y (17), llamadas ecuaciones de la onda cinemática, son resueltas simultáneamente.

De acuerdo con Singh (1996) y Guo (1998), el método numérico para el procedimiento del flujo superficial de onda cinemática requiere la conversión de una cuenca irregular a un plano rectangular, como se muestra en la figura 4.2, con una pendiente equivalente donde el hidrograma de tormenta puede ser simulado con el flujo superficial por unidad de ancho multiplicado por el ancho del plano. Entre todos los parámetros necesarios de la cuenca, el ancho del plano es un pre-requisito para la modelación numérica del escurrimiento cuando se emplea el método de OC (Guo, 1998).

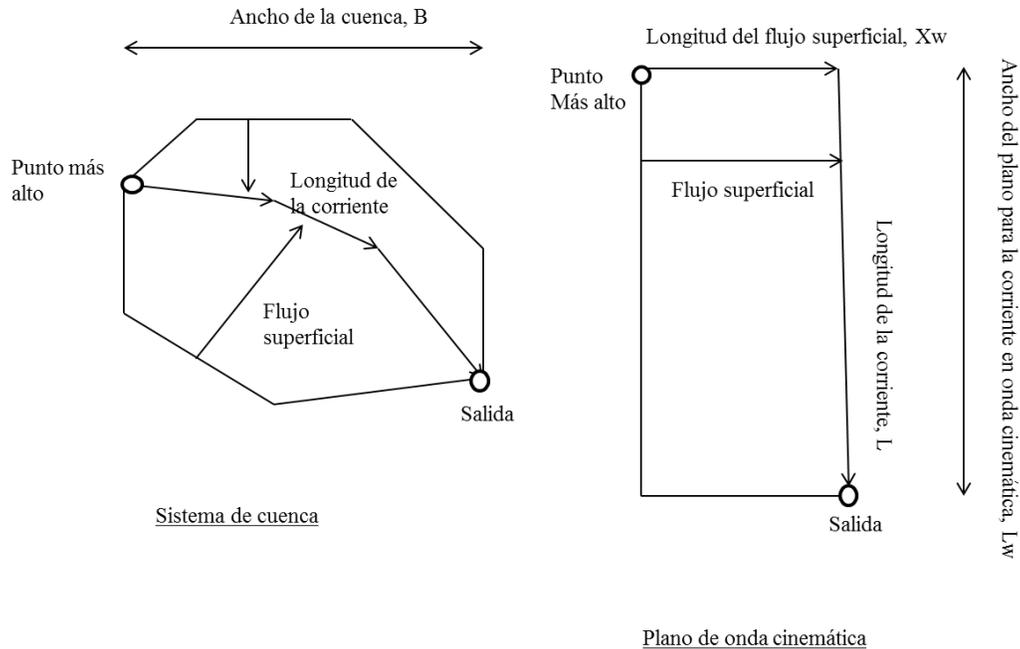


Figura 4.2. Conversión de cuenca natural a plano rectangular de OC (Guo *et al.*, 2012).

De acuerdo con MacArthur y De Vries (1993) un parámetro crítico en la descripción del flujo superficial es el parámetro L_w (figura 4.2). Una elección apropiada de L_w es vital ya que es el parámetro más importante que determina las características de la respuesta del flujo superficial. Puede ser definida como la máxima longitud de la ruta tomada por una gota de agua para alcanzar una corriente, o también como la distancia típica que recorre el flujo al interior de la cuenca para llegar a una corriente. Por su parte en el manual del SWMM, Storm Water Management Model (Rossman, 2010) sugiere que una estimación inicial del ancho de L_w está dada por el área de la cuenca dividida por el promedio de la longitud máxima de escurrimiento superficial y posteriormente el modelo necesita ser calibrado para confirmar la selección del ancho del plano de onda cinemática y otros parámetros.

Vieira (1983) concluye que la ecuación de onda cinemática puede ser utilizada en áreas naturales con un número de onda cinemática, $k \gg 50$. Ponce (1991) compara la ecuación de onda cinemática con el hidrograma unitario como un método práctico para tránsito de flujo superficial.

Singh (2001) concluye que la teoría de onda cinemática es una herramienta aceptada para modelar diversos problemas en hidrología, ambiente y recursos hídricos, especialmente el flujo superficial como en la zona no saturada.

Jinkang *et al.* (2007) modelaron el escurrimiento superficial y en corrientes usando una aproximación unidimensional de la onda cinemática a las ecuaciones de Saint Venant y el método de solución fue el esquema implícito de diferencias finitas:

Ecuaciones para el escurrimiento superficial con la onda cinemática:

a). Ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial l} = r \quad (18)$$

b). Ecuación de momentum:

$$Sf = S_0 \quad (19)$$

Donde h es la lámina de agua en la superficie (m); q es el caudal por unidad de ancho; r es el flujo vertical entrante (m/s); l es la longitud de la pendiente (m); t es el tiempo (s); Sf es la pendiente de fricción y S_0 es la pendiente de la superficie.

La tasa de flujo superficial se calcula con la ecuación de Manning:

$$V = Sf^{1/2} h^{2/3} / n \quad (20)$$

Donde n es el coeficiente de rugosidad superficial de Manning.

Ecuaciones para el flujo en corrientes:

a). Ecuación de continuidad:

$$\frac{dS}{dt} = I - Q - q \quad (21)$$

b). Ecuación de momentum:

$$Sf=S_0 \quad (22)$$

Donde S es el almacenamiento de agua en la corriente, I es el ingreso, Q es la salida, q es el ingreso lateral incluyendo tanto al superficial como al subsuperficial de todas las celdas adyacentes, Sf es la pendiente de fricción y S_0 es la pendiente de la corriente. La tasa de flujo es calculada por la ecuación de Manning (Chow *et al.* 1988) como:

$$V= Sf^{1/2}R^{2/3}/n \quad (23)$$

Donde V es la velocidad en la corriente, R es el radio hidráulico (área de flujo dividida por el perímetro mojado, para lo cual se requiere conocer el ancho de la corriente) y n es el coeficiente de rugosidad de Manning.

En las dos últimas décadas las ecuaciones de onda cinemática se han empleado en diferentes casos y modelos (Huang y Lee, 2012; Ajami *et al.*, 2004; Chua *et al.*, 2008; Jinkang *et al.*, 2007; Rai *et al.*, 2010; Mejía y Reed, 2011; Yu y Duan, 2014; Ur-Rehman, 2012; Chua y Wong, 2010; Kazezyilmaz-Alhan y Medina, 2007; Cheah *et al.*, 2008; Shultz *et al.*, 2008; Prasad, 2014) con buenos resultados.

El HEC-HMS incluye todos los modelos mencionados. En el flujo superficial existe la opción de simular un solo plano, ya sea de áreas naturales o urbanizadas; o la opción de simular en dos planos, cuando la subcuenca contenga los dos tipos de áreas. La distancia (Length) de la interfaz es la distancia (L_w) del plano de onda cinemática en la figura 4.2.

4.4. Simulación del proceso lluvia-escurrimiento en la cuenca del río Turbio

La cuenca del río Turbio (figura 4.3) se localiza en el extremo occidental del estado de Guanajuato, en los límites con el estado de Jalisco. En la misma figura se aprecian las estaciones meteorológicas convencionales (representadas con triángulo) y las estaciones meteorológicas

automáticas, EMA, (representadas con círculos). Su límite al Norte, que a su vez es la parte más alta, es la sierra de Comanja; al Sur el río Lerma, que a su vez es el punto de menor elevación. La Dirección de Protección Civil del Estado de Guanajuato reporta que el 67% de la extensión se localiza en este Estado y el 33% en el estado de Jalisco. El cuadro 4.1 muestra las características más importantes de la cuenca bajo estudio. Las avenidas ocurridas en el mismo a partir de la década de los 70's del siglo pasado han provocado inundaciones en poblaciones de todos los municipios mencionados, con los consiguientes daños como: la salud de las personas, las afectaciones en sus bienes personales, la interrupción de sus actividades económicas y pérdidas en las actividades agrícolas. Las inundaciones ocurridas en este milenio, de considerable importancia, corresponden a los años 2003 y 2007. En este trabajo se simuló el comportamiento lluvia-escurrimiento del evento de lluvia ocurrido del 24 al 30 de julio del 2007, ya que para calibrar el modelo, se requerían datos detallados de las tormentas registradas por las EMA's; la mayoría de las EMA's iniciaron su operación en el año 2007. Las inundaciones del 2003, que aunque fueron más severas que las del 2007, no fueron modeladas porque todavía no se contaban con EMA's para poder alimentar el modelo hidrológico.

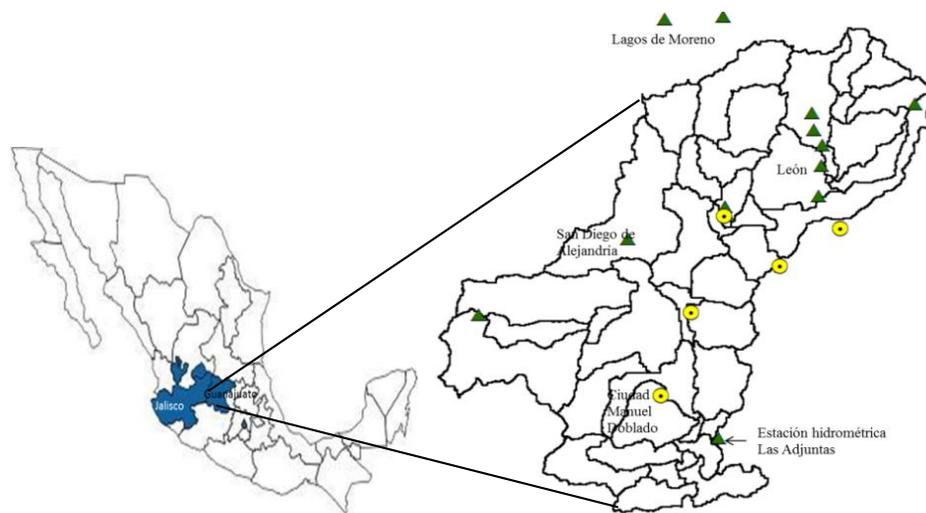


Figura 4.3. La cuenca del río Turbio hasta la estación hidrométrica Las Adjuntas.

Cuadro 4.1. Características de la cuenca del río Turbio, Guanajuato.

Característica	Descripción
Área	3290 km ² . hasta la estación hidrométrica Las Adjuntas
Estados donde se localiza	33% en Jalisco; 67% Guanajuato.
Pendiente media de la cuenca	9.20 %
Pendiente del cauce principal	0.57 %
Longitud del cauce principal	118 km
Longitud total de los tres Cauces secundarios	194 km
Tiempo de concentración	19 horas
Rango de elevaciones	Entre 2670 y 1723 msnm
Clase textural del suelo dominante	Fina 56% de la superficie total Media 33% de la superficie total
Principales usos de suelo	Agricultura de temporal 26.5%, agricultura de riego 15.3%, pastizal, matorral y huizache 50.2%, bosque de encino 6.3%, zona urbana 1.7%.
Poblaciones más grandes dentro de la cuenca	León, San Francisco del Rincón, y Manuel Doblado, todas en Guanajuato. Inmediatamente aguas abajo: Cuerámara, Abasolo y Pénjamo.
Número de pobladores en las poblaciones más grandes dentro de la cuenca	1, 347, 246 habitantes* La ciudad de León, Gto. por sí sola tiene 1,238, 962 habitantes
Las presas más grandes dentro de la cuenca	El Barrial, Jalpa Nueva, Potrerillos, El Palote, Ciénega
Lluvia promedio anual en toda la cuenca	659 mm (89 % de precipitación concentrada entre Junio y Octubre)
Años lluviosos, total de lluvia (Referente estación El Palote)	Año 2003, 1058 mm Año 2007, 825 mm
Caudales máximos históricos en la estación Las Adjuntas	149 m ³ /s; 21 de septiembre de 1971 130 m ³ /s; 17 de septiembre de 2003 52 m ³ /s; 28 de julio de 2007

*FUENTE: INEGI, 2010b. Censo de población y vivienda.

4.4.1. Metodología

Las diversas opciones de modelación lluvia-escorrentamiento desarrolladas en este trabajo se realizan en el ambiente de los software HEC-GeoHMS (USACE, 2013) y HEC-HMS (USACE,

2000; USACE, 2010a; USACE, 2010b). El HEC-GeoHMS trabaja instalado en el ambiente de ArcGIS 10.1 (ESRI, 2012).

En este trabajo se efectuó la simulación de la tormenta ocurrida entre el 24 y 30 julio del 2007. Los modelos fueron ejecutados con la información de lluvia representada a través de 13 hietogramas distribuidos espacialmente en la cuenca del Río Turbio de acuerdo al método de los polígonos de Thiessen; dichos hietogramas fueron alimentados al modelo con intervalos de tiempo de 30 minutos.

Se ejecutaron tres alternativas de modelo lluvia-escurrimiento para el evento de Julio de 2007, mencionado anteriormente. En los tres modelos, la conversión de lámina precipitada a lámina de escurrimiento directo, se efectuó con la metodología de curva numérica de escurrimiento. Los métodos que variaron en los tres modelos fueron (a) la transformación de lámina escurrida a hidrograma de escurrimiento directo, y, (b) el tránsito de avenidas en cauces. Esas tres combinaciones diferentes ejecutadas fueron: (1) Hidrograma unitario del SCS-Muskingum, (2) Onda cinemática-Muskingum, y (3) Onda cinemática-Onda cinemática. Las tres alternativas de modelos ejecutaron el tránsito de avenidas en las presas localizadas en la cuenca del Río Turbio, Guanajuato, México.

Los tres modelos fueron ejecutados en HEC-HMS generando un hidrograma a la salida de la estación hidrométrica Las Adjuntas. Los modelos fueron calibrados, teniendo como referente el hidrograma realmente medido en Las Adjuntas. El ajuste de las tres alternativas de modelos fue medido con el índice de eficiencia de Nash (Moriassi *et al.*, 2007):

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (Q_t^{obs} - Q_t^{sim})^2}{\sum_{t=1}^n (Q_t^{obs} - \bar{Q}^{obs})^2} \quad (24)$$

Donde Q_t^{sim} y Q_t^{obs} son los caudales simulados y observados en el tiempo t y n es el número de observaciones en el periodo considerado; \bar{Q}^{obs} = media aritmética de los caudales observados.

4.4.2. La información que alimentó a los tres modelos hidrológicos

Se tomó como base el continuo de elevaciones mexicano 3.0 (INEGI, 2013) el cual tiene una resolución de 15 m y se empleó la herramienta de geoprocésamiento incluida en la Extensión Espacial para Modelación hidrológica (HEC-GeoHMS V.10.1, USACE, 2013), extensión de dominio público para ArcGis. Se generó el modelo de cuenca subdividida en 43 subcuencas. Mediante la trasposición del modelo de cuenca con el conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación serie IV escala 1:250 000 (INEGI, 2010a) y el conjunto de datos vectorial edafológico escala 1:250,000 Serie II (INEGI, 2007), se obtuvieron los números de curva de escurrimiento (CN) por subcuenca. Para efectuar la simulación con OC se requiere conocer el área de sección transversal de las corrientes, las cuales fueron obtenidas en campo. El parámetro L_w se obtuvo al calcular la distancia típica de recorrido del escurrimiento al interior de cada subcuenca. Para tal efecto se obtuvo el promedio de 10 mediciones desde el límite de la subcuenca hasta la corriente, procurando incluir la diversidad de distancias por subcuenca; en el caso de subcuencas que incluyen tanto áreas naturales como urbanizadas, se calcula un valor de L_w para cada una ya que se generan dos planos de escurrimiento. El número de Manning para el flujo en canales (n) se obtiene de Chow (1994) y el parámetro de resistencia efectiva para flujo superficial (N) se obtiene de MacArthur y DeVries (1993). La información de los hietogramas de lámina precipitada fue obtenido a partir de la información de las EMA's; para tener una mayor cobertura de hietogramas, se utilizó la información de la lluvia reportada en 24 horas en las estaciones meteorológicas convencionales y se distribuyó en el tiempo de acuerdo al patrón presentado en las EMA's. El Cuadro 4.2 muestra un concentrado de las características generales

de las estaciones meteorológicas automáticas (EMA) y de las estaciones meteorológicas convencionales; asimismo, entre los datos de las estaciones meteorológicas, se presenta la lluvia registrada del 24 al 30 de julio del 2007. El cuadro 4.2 también presenta los datos generales de la estación hidrométrica Las Adjuntas. El cuadro 4.3 presenta las mediciones de los caudales realizadas por la CONAGUA del 27 al 30 de Julio del 2007, que fue el periodo donde se puso especial énfasis a la calibración del modelo, al comparar el hidrograma del modelo HEC-HMS con el hidrograma medido.

Cuadro 4.2. Estaciones meteorológicas convencionales, automáticas e hidrométrica.

Estación / Tipo	Clave	Altitud	Coordenadas	Organismo operador	Lluvia (mm) (24-30 de Julio/2007)
Las Adjuntas/ Convencional	11036	1720	101°50'40''O 20°40'32''N	SMN	72.4
El Palote/ Convencional	11020	1831	101°41'50''O 21°10'24''N	SMN	147.1
Guanajal/ Convencional	11023	1778	101°41'15''O 21°04''N	SMN	103.2
Hacienda de Arriba/ Convencional	11025	1950	101°42'O 21°12'N	SMN	87.0
Presa El Barrial/ Convencional	11159	1832	101°50'18''O 21°02'54''N	SMN	128.6
Los Castillos/ Convencional	11040	1895	101°41'O 21°09'N	SMN	148.7

Cuadro 4.2. (Continuación)

Media Luna/ Convencional	11045	2770	101°32'O 21°13'N	SMN	85.0
Purísima de Bustos/ Convencional	11055	1767	101°50'O 21°02'N	SMN	141.0
León (La Calzada)/ Convencional	11095	1850	101°41''O 21°07'N	SMN	99.0
La Vaquera/ Convencional	14369	2068	102°14''O 20°52'N	SMN	93.5
La Saucedá/ Convencional	14320	1950	101°51'O 21°21'N	SMN	80.6
Lagos/Convencional	14084	1884	101°56'30''O 21°20'50''N	SMN	69.2
San diego de Alejandría/ Convencional	14123	1931	101°59'30''O 20°59'30''	SMN	195.3
La Estancia/EMA		1870	101°45'O 20°57'N	CEAG	43.8
El Tigre/EMA		1740	101°53'20''O 20°52'40''N	CEAG	37.2
Las Adjuntas/ Hidrométrica	12391	1723	101°50'40''O 20°40'32''N	CONAGUA	

EMA=Estación meteorológica automática; SMN=Servicio Meteorológico Nacional; CEAG=Comisión Estatal del Agua de Guanajuato; CONAGUA=Comisión Nacional del Agua.

Fuente: Servicio Meteorológico Nacional (2014).

Cuadro 4.3. Mediciones de caudales en la estación hidrométrica 12391 Las Adjuntas.

Fecha	Hora	Caudal (m ³ /s)	Fecha	Hora	Caudal (m ³ /s)
27 julio 2007	6:00	10.46	29 julio 2007	7:00	47.89
	8:00	10.46		8:00	47.89
	12:00	10.46		12:00	44.81
	16:00	10.46		16:00	38.64
	20:00	10.46		20:00	32.48
28 julio 2007	6:00	23.23	30 julio 2007	7:00	25.08
	8:00	23.23		8:00	25.08
	12:00	25.12		12:00	28.43
	16:00	51.68		16:00	28.43
	20:00	47.89		20:00	28.43

Fuente: CONAGUA, 2015.

4.4.3. Calibración del modelo

La estimación de parámetros es el proceso de adaptar un modelo general a una cuenca específica. La medida cuantitativa de la bondad de ajuste entre los resultados de la simulación y el caudal observado se denomina función objetivo; esta mide el grado de variación entre el hidrograma simulado y el medido, y es igual a cero si estos son idénticos. La función objetivo mínima se obtiene cuando se encuentran los valores de los parámetros que mejor reproducen el hidrograma medido (Scharffenberg y Fleming, 2010). Partiendo de la certeza de que algunos de los modelos incluidos en HEC-HMS tienen parámetros que no pueden ser estimados por observación o mediciones en cauces o en la cuenca, Feldman (2000) indica que, si se cuenta con datos de lluvia y mediciones de caudales, la calibración es la respuesta a la pregunta ¿Cómo pueden ser seleccionados los valores adecuados de los parámetros? La calibración emplea datos hidrometeorológicos medidos, en una búsqueda sistemática de parámetros que proporcionen el mejor ajuste entre los escurrimientos medidos y los simulados. Sin embargo, el programa tiene bien definidos los intervalos de los valores permitidos para los parámetros y estos se reportan en el trabajo de Feldman (2000).

En este trabajo, una vez realizadas las simulaciones reportadas, se procede a calibrar los parámetros necesarios para obtener un mejor ajuste. En este caso se calibra el número de curva de escurrimiento, *CN*, ya que es el de mayor incidencia en el comportamiento de los hidrogramas: a menor *CN* se obtiene menor gasto pico. El *CN* se calibra para todas las subcuencas en todos los casos con los resultados obtenidos de la opción “Create Optimization Trial” de HEC-HMS y posteriormente se hace un ajuste adicional con información obtenida en el recorrido de campo. En general, el valor del *CN* calibrado (en promedio, 56 para áreas naturales y 83 para zonas urbanas) es 76% del valor del *CN* original obtenido en Hec-GeoHMS: comportamiento ya reportado por Hawkins (1993), quien indica que el valor de *CN* disminuye continuamente conforme se incrementa la lámina precipitada así como también conforme aumenta el tamaño de la tormenta.

4.5. Resultados

La figura 4.4 muestra el hidrograma resultante al simular la conversión de lámina escurrida a caudal con el hidrograma unitario del SCS y el tránsito hidrológico de avenidas en cauces con el método de Muskingum, antes de la calibración del *CN*. El hidrograma observado muestra un gasto pico de 51.7 m³/s y un tiempo al pico de 19 h y el simulado un gasto pico de 76 m³/s con un tiempo al pico de 20 h.

En la figura 4.5 se muestra el hidrograma resultante al simular la conversión de lámina escurrida a caudal con el hidrograma unitario del SCS y el tránsito hidrológico de avenidas en cauces con el método de Muskingum, después de la calibración del *CN* para todas las subcuencas. El hidrograma simulado reporta un gasto pico de 51.8 m³/s y un tiempo al pico de 21 h; es decir, el valor del gasto pico prácticamente coincide, pero el tiempo al pico se atrasa 1 h.

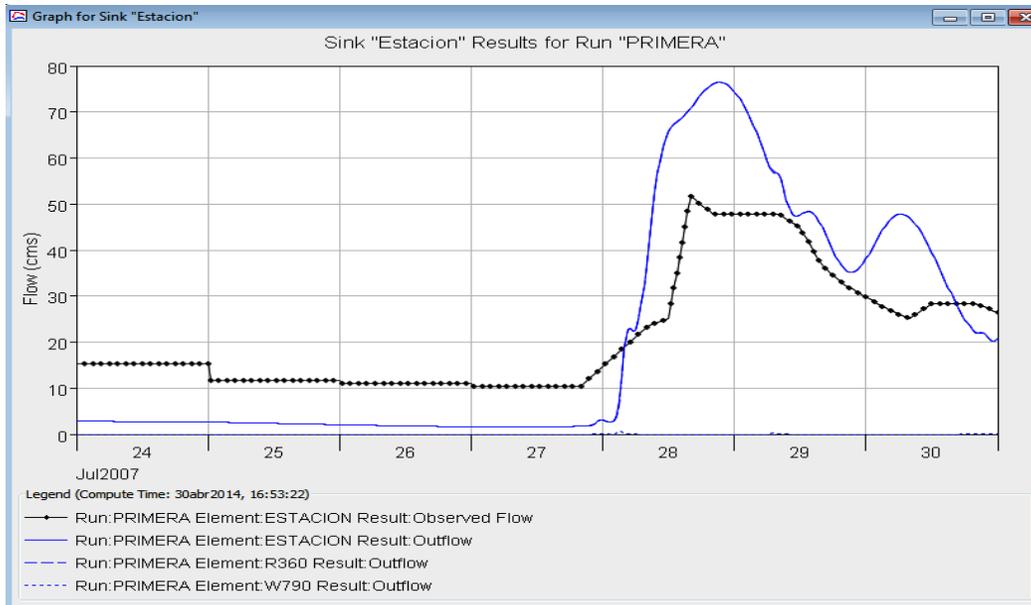


Figura 4.4. Simulación con el hidrograma unitario del SCS, y tránsito hidrológico en cauces con el método de Muskingum antes de calibrar *CN*.

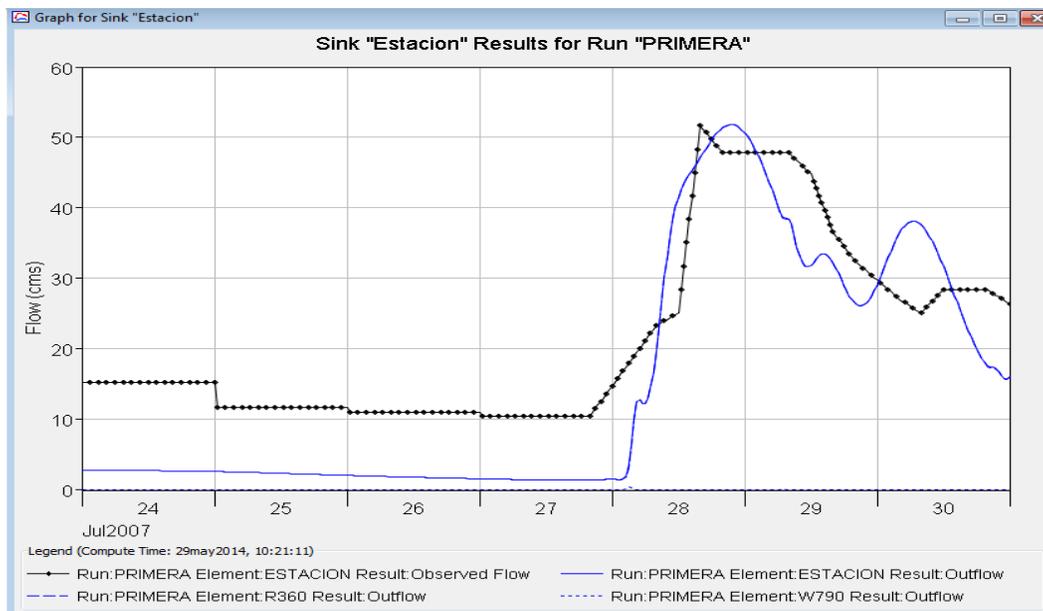


Figura 4.5. Simulación con el hidrograma unitario del SCS, y tránsito en cauces con el método de Muskingum, una vez optimizado el *CN*.

En la figura 4.6 se observa el hidrograma resultante al convertir la lámina escurrida a caudal con onda cinemática y el tránsito en cauces con Muskingum. En esa simulación se consideró L_w de zonas urbanas, antes de la calibración de CN . En este se obtiene un gasto pico de $65 \text{ m}^3/\text{s}$ y un tiempo al pico de 22h.

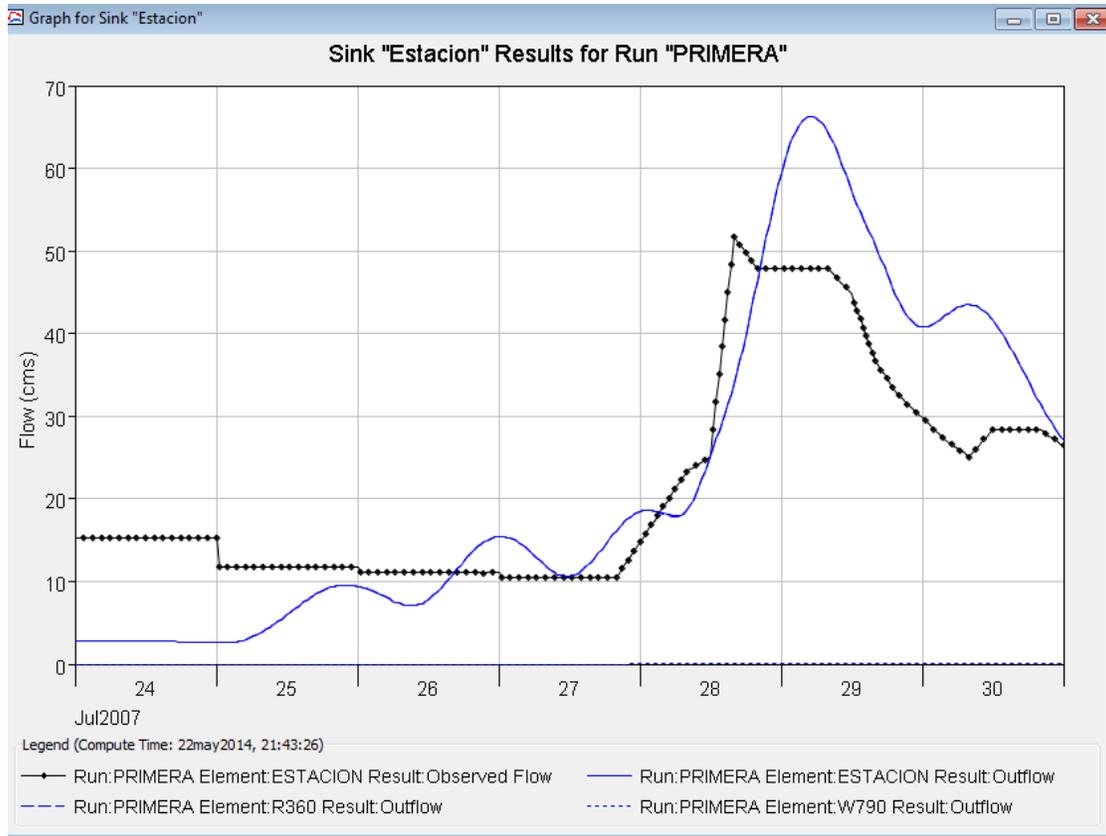


Figura 4.6. Simulación de escurrimiento superficial con onda cinemática y tránsito en cauces con el método de Muskingum antes de calibrar CN .

La figura 4.7 muestra el hidrograma simulado una vez calibrado el CN , con un gasto pico de $55 \text{ m}^3/\text{s}$ y el tiempo al pico se disminuye a 21h.

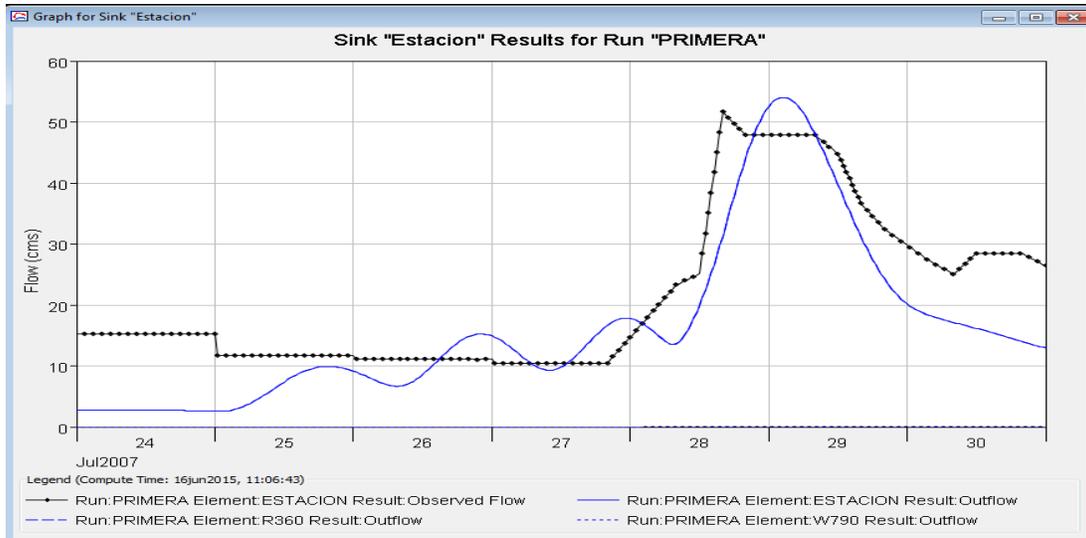


Figura 4.7. Simulación de escurrimiento superficial con onda cinemática y tránsito hidrológico en cauces con el método de Muskingum después de calibrar *CN*.

En la figura 4.8 se puede ver el resultado de la simulación con onda cinemática para escurrimiento superficial y tránsito en cauces, considerando L_w de zonas urbanas antes de calibrar *CN*. Se obtiene un gasto pico de $92 \text{ m}^3/\text{s}$ y un tiempo al pico de 7 h.

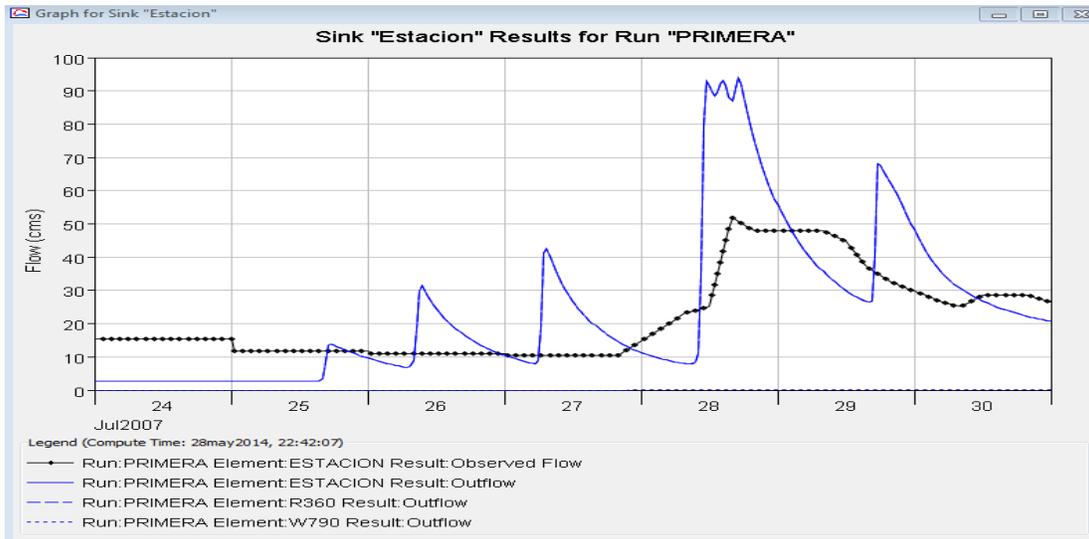


Figura 4.8. Simulación de escurrimiento superficial con onda cinemática y tránsito de avenidas en cauces antes de calibrar *CN*.

La figura 4.9 muestra la simulación con onda cinemática superficial y en cauces posterior a la calibración de *CN*, considerando el parámetro *L_w* de zonas urbanas. El gasto pico disminuye a 70 m³/s y el tiempo al pico disminuye a 6 h.

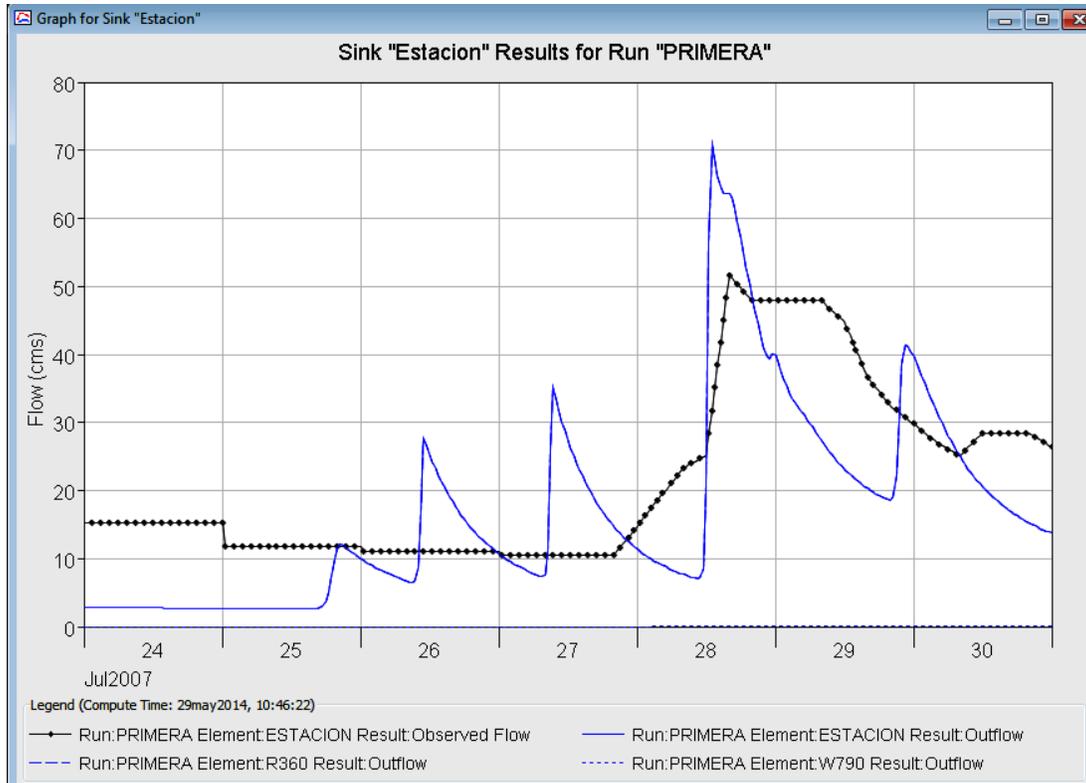


Figura 4. 9. Simulación de escurrimiento superficial con onda cinemática y tránsito de avenidas en cauces después de calibrar *CN*.

4.5.1. Índices de Nash para las tres simulaciones

El cuadro 4.4 muestra los ajustes del modelo hidrológico superficial para las tres combinaciones de metodologías usadas: (1) Se usa HU sintético para convertir la lámina escurrida en hidrograma y el tránsito de avenidas en cauces se realiza con Muskingum; (2) Se utiliza la onda cinemática para convertir la lámina escurrida en hidrograma y el tránsito de avenidas en cauces se realiza

con Muskingum; y, (3) Se utiliza la onda cinemática, tanto para convertir la lámina escurrida en hidrograma como para realizar el tránsito de avenidas en cauces. En este trabajo no se intentó probar la combinación HU-Onda cinemática porque el coeficiente de Nash reportaba valores alrededor de 0.0, el cual es un modelo no aceptable. Cabe recordar que en los tres casos de modelos con un posible buen ajuste, la lámina precipitada horaria, se convirtió en lámina escurrida, al utilizar el número de curva de escurrimiento del extinto SCS. Esta aclaración permite la autocrítica de que en trabajos posteriores, dicha conversión de lámina de lluvia horaria a lámina escurrida, se pudiera intentar hacerla con el método de infiltración de Green-Ampt.

Cuadro 4.4 Índices de Nash obtenidos en el modelo hidrológico del río Turbio.

MÉTODO	NSE
HU-Muskingum	0.608
Onda cinemática-Muskingum	0.798
Onda cinemática-Onda Cinemática	0.100

Se puede observar en el cuadro 4.4, que la mejor combinación para el modelo lluvia-escurrimiento del río Turbio es aquella combinación onda cinemática-Muskingum. En dicha combinación metodológica la conversión de la lámina escurrida a hidrograma (caudal) se realiza con la onda cinemática y el tránsito de avenidas en cauces con el método de Muskingum. Aunque se aprecia que la metodología tradicionalmente usada en México HU-Muskingum, su ajuste no es tan malo. En realidad, en México se prefiere tal combinación porque es más fácil alimentar el modelo hidrológico con los parámetros que requiere tal metodología. Note que la combinación onda cinemática-onda cinemática su ajuste medido con el índice de Nash es muy pobre. Es decir,

dicho valor al compararse con la combinación onda cinemática-Muskingum, indica que el tránsito hidrológico en cauces con el método de Muskingum, sigue siendo una buena recomendación. Es decir, el tránsito en cauces con la onda cinemática funcionó mal, lo cual puede explicarse en base al documento del Arizona Department of Water Resources (2007, pág. 48) el cual señala que un modelo de cuenca con numerosas subcuencas y en la cual se conectan cauces cortos puede resultar en una gran sobreestimación del gasto pico a la salida de la cuenca. Se pudiera pensar en realizar un tránsito hidráulico en el cauce principal, de 118 km, y en los tres tributarios principales, cuya longitud suma aproximadamente 194 kilómetros, pero eso implica realizar levantamientos topográficos-batimétricos por lo menos cada 500 metros, lo cual implica levantar 236 secciones transversales en el cauce principal y 388 secciones transversales en los tres tributarios, y al considerar que al modelar una avenida extrema, cada sección transversal tendría que ser levantada tanto en la cubeta como en las márgenes; es decir transversalmente cada una de las 624 secciones sería de aproximadamente unos 300 metros, lo cual es algo muy complejo. Además un tránsito hidráulico vuelve complejo el proceso de modelación hidrológica porque significaría entrar y salir entre un modelo hidrológico como el HEC-HMS y un modelo hidráulico como el HEC-RAS. Aunque como ejercicio académico no se descarta esa posibilidad, pero como realidad técnica es difícil implementar un modelo así de complejo.

4.6. Conclusiones

La mejor simulación del proceso lluvia-escorrentía en la cuenca del río Turbio es la combinación Onda Cinemática-Muskingum, es decir, la lámina escurrida se convierte en hidrograma con la teoría de la onda cinemática, y el tránsito en cauces es el de Muskingum con un coeficiente NSE de 0.735. La segunda mejor simulación del proceso lluvia-escorrentía en la cuenca del río Turbio es el modelo tradicional Hidrograma Unitario del SCS y tránsito

hidrológico en cauces con Muskingum, con un coeficiente de NSE de 0.608. El peor modelo fue aquel en el que se utilizó totalmente el modelo de onda cinemática con NSE de 0.1. Considerando el criterio de Moriasi *et al.* (2007) en lo que respecta al coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE), el primer método proporciona un resultado satisfactorio, el segundo un resultado bueno y el tercero un resultado no satisfactorio. La hipótesis inicial se cumple parcialmente ya que solo ocurrió un mejor comportamiento al utilizar la metodología de la onda cinemática en lugar de la metodología del hidrograma unitario sintético del SCS. Se recomienda aplicar el método de onda cinemática en otras cuencas del país para generar mayor experiencia y contrastar resultados.

Agradecimientos

A la Comisión Estatal de Aguas del Estado de Guanajuato (CEAG) por proporcionar los datos de lluvia cada 15 minutos de sus estaciones meteorológicas automáticas del año 2007.

4.7. Referencias

Ajami, N.K., H. Gupta, T. Wagener, S. Sorooshian. (2004). Calibration of a semi-distributed hydrologic model for streamflow estimation along a river system. *Journal of Hydrology*. 298:112–135.

Aparicio, M.J. (2012). *Fundamentos de hidrología de superficie*. Limusa. 105-106.

Arizona Department of Water Resources. (2007). Flood Mitigation Section State. Standard for Hydrologic Modeling Guidelines. Recuperado de http://www.azwater.gov/AzDWR/SurfaceWater/FloodManagement/documents/Hydrology_State_Standard.pdf. Consultado Mayo 5, 2015.

Chang, C.N., E.D.M. Singer, A.D. Koussis. (1983). On the mathematics of storage routing. *Journal of Hydrology*. 61:357–370.

Cheah, C.H., J.E. Ball, R.J. Cox. (2008). Kinematic wave modeling of surface runoff quality for small urban catchments. 11th International Conference on Urban Drainage, Edinburgh, Scotland, UK.

Chow, V.T. (1994). Hidráulica de Canales Abiertos. McGraw-Hill. 667 pp.

Chow, V.T., D.R. Maidment, L.W. Mays. (1988). Applied Hydrology. McGraw-Hill Book Company.

Chua, L.H.C., T.S.W. Wong, L.K. Sriramula. (2008). Comparison between kinematic wave and artificial neural network models in event-based runoff simulation for an overland plane. Journal of Hydrology. 357:337– 348.

Chua, L.H.C., T.S.W. Wong. (2010). Improving event-based rainfall–runoff modeling using a combined artificial neural network–kinematic wave approach. Journal of Hydrology. 390:92–107. doi:10.1016/j.jhydrol.2010.06.037.

CONAGUA. (2012). Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales. ftp://ftp.conagua.gob.mx/Bandas/Bases_Datos_Bandas/. Consultado el 6 de Julio del 2015.

ESRI. (2012). ArcMap 10.1. Software.

Feldman, A.D. (2000). Hydrologic Modeling System HEC-HMS. Technical Reference Manual. United States Army Corps of Engineers, USACE.

Gill, M.A. (1979). Critical examination of the Muskingum method. Nordic Hydrol. 10:261–270.

Guo, J.C.Y. (1998). Overland Flow on a Pervious Surface. IWRA International Journal of Water. 23(2).

Guo, J., J. Cheng, L. Wright. (2012). Field test on conversion of natural watershed into kinematic wave rectangular plane. J. Hydrol. Eng. 17(8):944-951.

Hawkins, R.H. (1993). Asymptotic determination of runoff curve numbers from data. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 119(2):334-345.

Huang, P., K.T. Lee. (2012). An efficient method for DEM-based overland flow routing *Journal of Hydrology*. 489:238–245. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.03.014>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía, INEGI. (2007). Conjunto de Datos Vectorial Edafológico, Escala 1:250,000 Serie II (Continuo Nacional). Recuperado de <http://www.inegi.org.mx/>. Consultado Enero 18, 2014.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía, INEGI. (2010a). Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación serie IV escala 1:250 000. Recuperado de <http://www.inegi.org.mx/>. Consultado Enero 18, 2014.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía, INEGI. (2010b). Censo de Población y Vivienda 2010. Recuperado de <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/gto/poblacion/default.aspx?t>. Fecha de consulta, Junio 15, 2015.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía, INEGI. (2013). Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0). Recuperado de <http://www.inegi.org.mx/>. Consultado Noviembre 15, 2013.

Jinkang, D., X. Shunping, X. Youpeng, C. XU, V.P. Singh. (2007). Development and testing of a simple physically-based distributed rainfall-runoff model for storm runoff simulation in humid forested basins. *Journal of Hydrology*. 336: 334– 346.

Juárez-Méndez, J., L.A. Ibáñez-Castillo, S. Pérez-Nieto, J.L.L. Arellano-Monterrosas. (2010). Uso del suelo y su efecto sobre los escurrimientos en la cuenca del río Huehuetán. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas* 1(2): 69-76. doi: 10.5154/r.inagbi.2009.07.015

Kazezyilmaz-Alhan, C.M., M.A. Medina. (2007). Kinematic and diffusion waves: Analytical and numerical solutions to overland and channel flow. *J. Hydraul. Eng.* 133(2).

Lighthill, M.J., G.B. Whitham. (1955a). On kinematic waves: 1. Flood movement in long rivers. Proceedings, Royal Society, London, Series A 229: 281–316.

Lighthill, M.J., G.B. Whitham. (1955b). On kinematic waves: 2. A theory of traffic flow on long crowded roads. Proceedings, Royal Society, London, Series A 229: 317–345.

Macarthur, R., J.J. Devries. (1993). Introduction and application of kinematic wave routing techniques using HEC-1. Hydrologic Engineering Center. USACE.

MCCarthy, G.T. (1938). The unit hydrograph and flood routing. Presented at Conf. North Atlantic Div., US Army Corps Eng., New London, CT. US Engineering Office, Providence RI.

MCCuen, R.H. (2005). Hydrologic Analysis and Design, Third ed. Section 10.5.1 Estimation of the Muskingum Routing Coefficients. Prentice Hall, NJ (Chapter 10). 859 p.

Mejia, A.I., S.M. Reed. (2011). Evaluating the effects of parameterized cross section shapes and simplified routing with a coupled distributed hydrologic and hydraulic model. Journal of Hydrology. 409:512–524. doi:10.1016/j.jhydrol.2011.08.050.

Miller, J.E. (1984). Basic concepts of kinematic-wave models. U.S. Geological Survey Professional Paper 1302.

Miranda-Aragón, L., L. A. Ibáñez-Castillo, J.R. Valdez-Lazalde, P. Hernández-De la Rosa. (2009). Modelación hidrológica empírica del gasto de 100 años de periodo de retorno del río Grande, Tlalchapa, Guerrero en dos escenarios de uso del suelo. Agrociencia. 43:333-344.

Mockus, V. (1949). Estimation of total (peak rates of) surface runoff for individual storms. Exhibit A of Appendix B, Interim Survey Rep. Grand (Neosho) River Watershed, USDA, Washington, D.C.

Moriasi, D.N., J.G. Arnold, M.W. Van Liew, R.L. Bingner, R.D. Harmel, T.L. Veith. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations.

American Society of Agricultural and Biological Engineers. 50(3): 885–900. Recuperado de <http://naldc.nal.usda.gov/download/9298/PDF>.

O’Sullivan, J.J., S. Ahilan, M. Bruen. (2012). A modified Muskingum routing approach for floodplain flows: Theory and practice. *Journal of Hydrology* 470–471:239–254.

Ponce, V.M. (1991). The kinematic wave controversy. *Journal of hydraulic engineering*. 117(4):511-525.

Prasad, G.N. (2014). Flow routing with Semi-distributed hydrological model HEC- HMS in case of Narayani River Basin. *Journal of the Institute of Engineering*. 10(1): 45–58.

Rai, R.K., A. Upadhyay, V.P. Singh. (2010). Effect of variable roughness on runoff. *Journal of Hydrology*. 382:115–127. doi:10.1016/j.jhydrol.2009.12.022.

Raudkivi, A.J. (1979). *Hydrology*. Pergamon Press.

Rossman, L.A. (2010). *Storm Water Management Model, Users Manual, Version 5.0.*

Recuperado de <http://nepis.epa.gov/Adobe/PDF/P100ERK4.pdf>

Scharffenberg, W.A., M.J. Fleming. (2010). *Hydrologic Modeling System HEC-HMS. User’s Manual, version 3.5*. U.S. Army Corps of Engineers.

Servicio Meteorológico Nacional. (2014). Normales climatológicas. Climatología diaria por estación visualizada en GoogleEarth.

http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=42&Itemid=28.

Consultado el 20 de Mayo 2014.

Shultz, M.J., E.C. Crosby, J.A. MCenery. (2008). Kinematic wave technique applied to hydrologic distributed modeling using stationary storm events: an application to synthetic rectangular basins and an actual watershed. *Hydrology Days 2008*. Colorado State University. http://hydrologydays.colostate.edu/papers_2008/shultz_paper.pdf

Singh, V. P. (1996). *Kinematic wave modeling in water resources*. Wiley, New York. 1424 p.

Singh, V.P. (2001). Kinematic wave modeling in water resources: a historical perspective. *Hydrological processes*. 15:671-706.

Singh, V.P. (2002). Is hydrology kinematic? *Hydrological processes*. 16:667-716.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Natural Resources Conservation Service. (2004). National Engineering Handbook Hydrology Chapters. <http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detailfull/national/water/?cid=stelprdb1043063>

UNITED STATES OF AMERICA CORPS OF ENGINEERS, USACE. (2000). Hydrologic Modeling System HEC-HMS. Technical Reference Manual. 149 p.

UNITED STATES OF AMERICA CORPS OF ENGINEERS, USACE. (2010a). Hydrologic Modeling System HEC-HMS V.3.5. Release Notes. 11 p.

UNITED STATES OF AMERICA CORPS OF ENGINEERS, USACE. (2010b). Hydrologic Modeling System HEC-HMS V.3.5. User's Manual. 306 p.

UNITED STATES OF AMERICA CORPS OF ENGINEERS, USACE. (2013). Geospatial Hydrologic Modeling Extension HEC-Geo-HMS V.10.1. User's Manual. 193 p.

Ur-Rehman, A. S. (2012). Hydrologic analysis of a semi-arid watershed using kinematic wave and SCS flow models. Ph.D. Thesis; Michigan State University. <http://etd.lib.msu.edu/islandora/object/etd%3A688/datastream/OBJ/view>

Vieira, J.H.D. (1983). Conditions Governing the Use of Approximations for the Saint-Venant Equations for Shallow Surface-Water Flow. *Journal of Hydrology*. 60(1-4): 43-58.

Vieux, B.E., Z. Cui, A. Gaur. (2004). Evaluation of a physics-based distributed hydrologic model for flood forecasting. *Journal of Hydrology*. 298:155–177.

Weaver, J.C. (2003). Methods for Estimating Peak Discharges and Unit Hydrographs for Streams in the City of Charlotte and Mecklenburg County, North Carolina. U.S. Geological Survey. Water-Resources Investigations Report 03–4108.

Yu, C., J.G. Duan. (2014). High Resolution numerical schemes for solving kinematic wave equation. *Journal of Hydrology*. 519 (A):823-832.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una revisión detallada de los hidrogramas resultantes del modelo de mejor ajuste por subcuenca muestra que, de las 43, son solamente 6 las que producen hidrogramas con gastos pico significativos y que las mismas, de hecho, determinan el comportamiento del hidrograma general mostrado en la figura 5.1. Todas ellas incluyen una porción de superficie urbanizada.

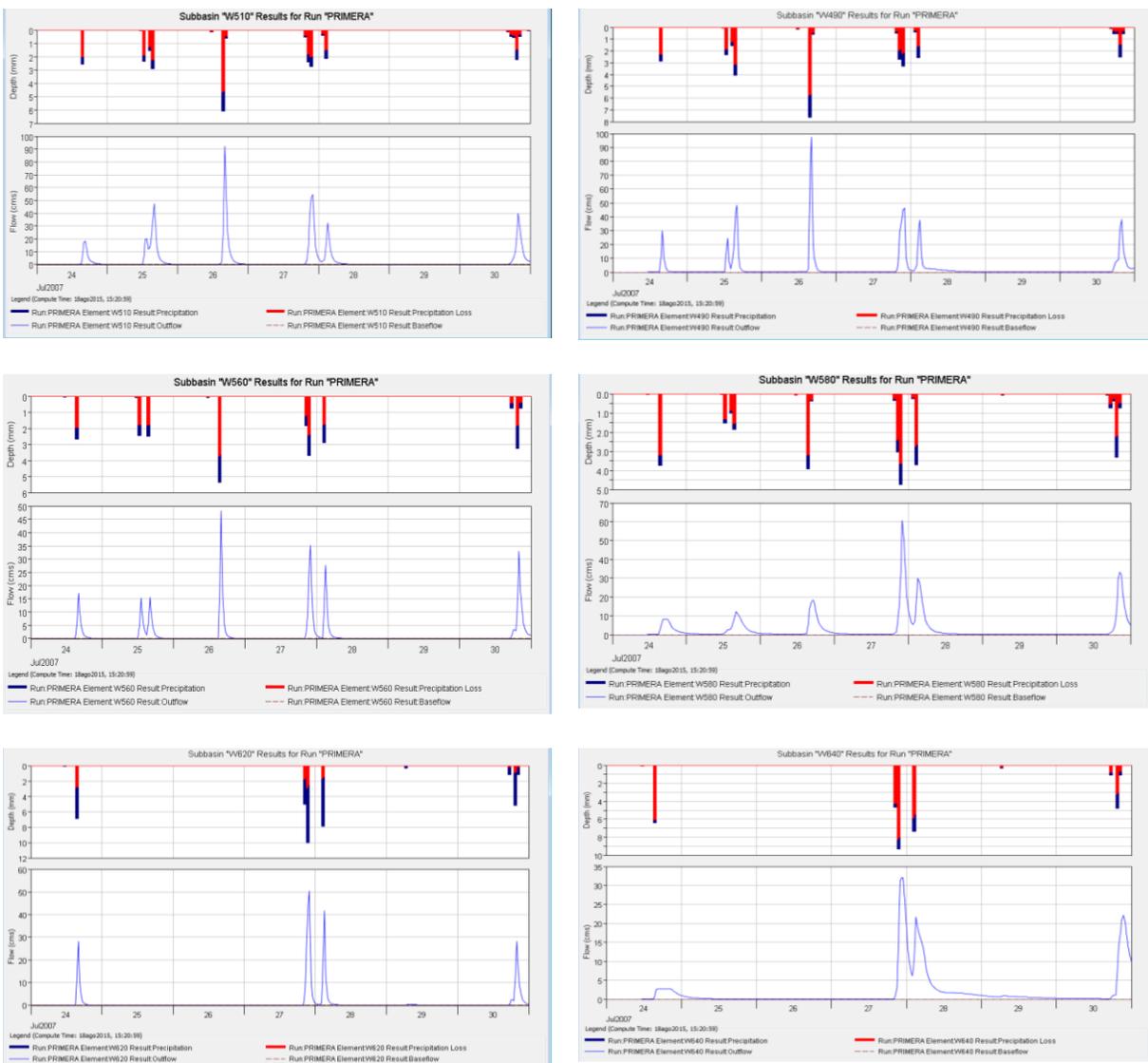


Figura 5.1. Hidrogramas con gastos pico significativos.

En la figura 5.2 se muestra la localización de las subcuencas en las que se generan escurrimientos considerables; en cuatro de ellas localizadas en la parte alta de la cuenca se incluyen porciones de la ciudad de León y en las dos restantes localizadas en la parte media se incluyen porciones de San Francisco del Rincón.



Figura 5.2. Localización de las subcuencas que generan escurrimientos significativos.

En el cuadro 5.1 se resumen las características de las subcuencas mencionadas así como los resultados en gasto pico y en producción de escurrimientos que se obtuvieron en cada una de ellas para la tormenta del 27-28 de julio del 2007.

Cuadro 5.1. Características y resultados de las subcuencas con gastos pico significativos.

SUBCUENCA	GASTO PICO (m ³ /s)	SUPERFICIE (km ²)	NC (ÁREA NATURAL)	NC (ÁREA URBANA)	SUPERFICIE URBANA (%)	PRODUCCIÓN (Miles de m ³)
W510	92.5	141.71	57	83	30	1925.4
W490	97.4	91.59	57	83	30	1672.6
W560	48	50.12	60	83	40	879
W580	60.6	138.84	55	83	30	1687.6
W620	50.5	12.25	60	83	85	674.5
W640	32.1	121.28	57	83	20	1140
TOTAL						7979.1

Al hacer una comparación entre la producción total de la cuenca que fue de 9,547.2 miles de m³ con la producción de las 6 subcuencas, resulta que las mismas produjeron el 83.5 % del total.

De acuerdo al Instituto Municipal de Planeación (IMPLAN), en la década de los años cincuenta la ciudad de León experimentó un crecimiento acelerado en el proceso de urbanización y expansión de la ciudad como resultado de la industrialización de los talleres de calzado, sector que marcó el soporte económico del municipio y propició una fuerte demanda de empleo. Lo anterior nos muestra que la urbanización acelerada a partir de la década de los cincuenta del siglo pasado al interior de la cuenca ha sido un factor determinante en la expansión de la superficie

impermeable al interior de la cuenca, ya que actualmente solamente la ciudad de León cubre una superficie de 233 km² (demographia.com). Dichas superficies impermeables están asociadas con el NC 83 del cuadro 5.1, mismo que determina una mayor generación de escurrimientos. La producción de escurrimientos en el resto de las subcuencas fluctúa desde cero hasta 10 metros cúbicos por segundo lo cual es un indicador de que el sistema de presas existente al interior de las mismas aún es eficiente en el control de avenidas. Sin embargo, los escurrimientos de las áreas urbanas fluyen directamente al río.

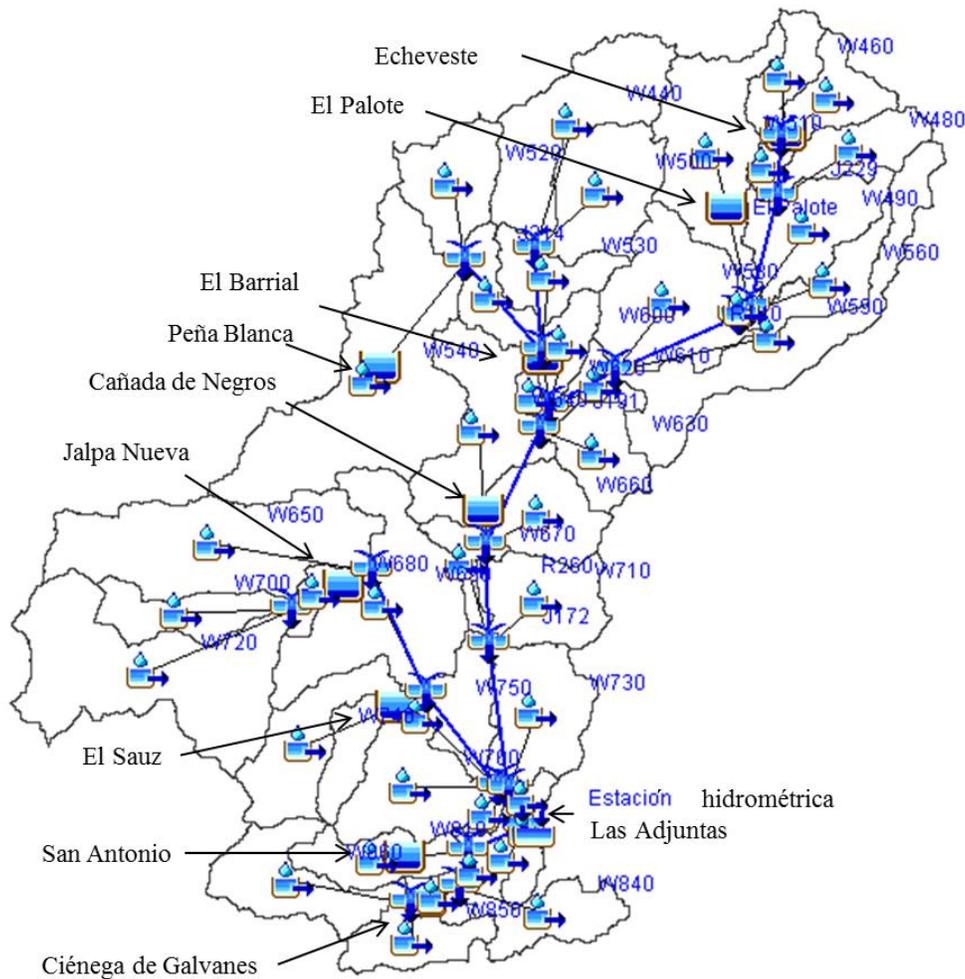


Figura 5.3. La cuenca del río Turbio en HEC-HMS mostrando las principales presas.

Si bien en la semana del 24 al 30 de julio del 2007 ocurrió una precipitación promedio de 102.1 mm al interior de la cuenca, fue la tormenta ocurrida entre los días 27 y 28, con una precipitación promedio de 30.4 mm, la que ocasionó el gasto pico de 51.68 m³/s a las 16 horas del día 28 con una lectura en el limnómetro de 2.8m, muy cercana a la altura máxima que es de tres metros.

Debido a que se prevé un incremento significativo en la actividad industrial de la región durante los próximos años es de esperarse que las áreas urbanizadas también crezcan y con ello los riesgos de inundaciones en las municipios de la parte media y baja de la cuenca, ante lo cual es recomendable que se establezca un plan de manejo integral de la misma.

5.1. Referencias

<http://implan.gob.mx/implan/antecedentes.html>

<http://www.demographia.com/db-worldua.pdf>

CAPÍTULO 6

6. CONCLUSIONES

La revisión realizada acerca de los modelos hidrológicos nos indica que la evolución de la herramienta computacional ha permitido aumentar el nivel de complejidad de los mismos con lo cual los procesos hidrológicos que ocurren en la cuenca están mejor representados y se logran mejores niveles de precisión. Al mismo tiempo también se reconoce que ante la escasez de datos hidrometeorológicos, existen modelos simples que proporcionan un buen acercamiento al pronóstico de caudales. En el presente trabajo, el programa HEC-HMS permitió simular los escurrimientos con tres propuestas diferentes y fue adecuado para los fines definidos, considerando la cantidad y calidad de datos hidrometeorológicos existentes para la cuenca bajo estudio; adicionalmente, es un software de acceso libre y su acoplamiento con ArcGis proporciona una representación muy precisa de los elementos de la cuenca. En México es necesario generar modelos hidrológicos propios que tengan mayor concordancia con las condiciones climáticas y fisiográficas del territorio, ya que casi todos los existentes se han creado en Estados Unidos, Europa y Japón; para lo anterior es necesario impulsar el equipamiento de cuencas experimentales en universidades o centros de investigación y esto toma más relevancia en un escenario de cambio climático ya que se prevé que los desastres asociados a tormentas extremas aumenten en los próximos años.

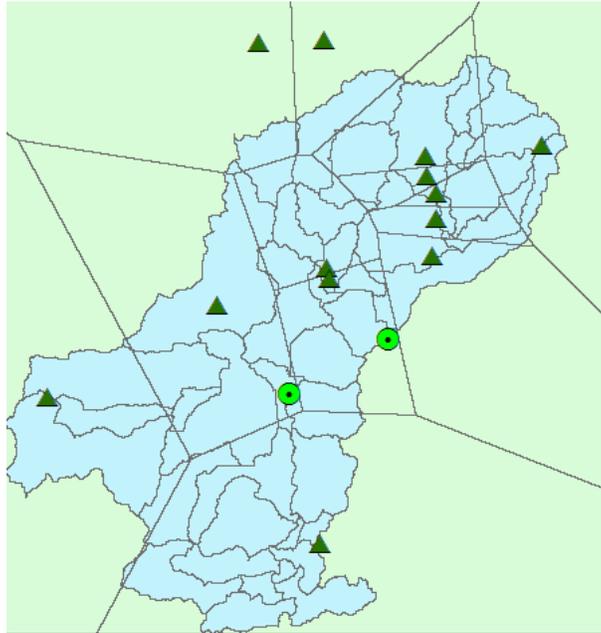
Los resultados de la simulación de escurrimientos en la cuenca del río Turbio nos indican que, numéricamente, la propuesta de mejor ajuste estadístico es la combinación de onda cinemática para escurrimientos en laderas y método de Muskingum para tránsito de avenidas en cauces y la de peor ajuste es aquella que emplea onda cinemática tanto para laderas como para tránsito de avenidas. Ante ello, se recomienda emplear la primer propuesta mencionada en otras cuencas del país, sobre todo en aquellas que muestren similitudes con la analizada en este trabajo es decir,

que incluyan tanto áreas urbanas como naturales pero que cuenten con más información sobre todo hidrométrica para, además de calibrar el modelos, pasar a las etapas de validación y verificación.

La revisión detallada a nivel subcuenca permitió determinar que los escurrimientos generados en aquellas que incluyen en su superficie áreas urbanizadas, son los que determinaron el comportamiento del hidrograma a la salida de la cuenca determinada para este trabajo, es decir, en la estación hidrométrica Las Adjuntas. La creciente urbanización de las ciudades de León y San Francisco del Rincón en las cuatro décadas recientes han determinado en gran medida que esto ocurra, ya que se localizan en la parte alta y media de la cuenca y los escurrimientos generados en las mismas fluyen directamente al río Turbio, lo que impacta directamente a las poblaciones de la parte baja, sobre todo en los municipios de Abasolo y Pénjamo. Ante esto, se propone transitar de las obras de prevención de inundaciones tales como reforzamiento de bordos en las épocas de lluvias u otras obras de protección, sin excluirlas, a un esquema de gestión integral de los recursos hídricos de la cuenca que permita tanto aprovechar el agua de lluvia para satisfacer las necesidades de la sociedad como evitar las afectaciones patrimoniales de la población que vive en las áreas de mayor riesgo de inundaciones.

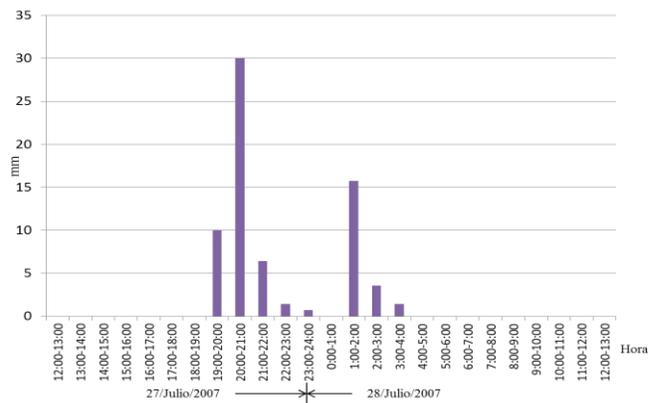
ANEXOS

Estaciones meteorológicas convencionales y automáticas y su área de influencia definida por polígonos de Thiessen.

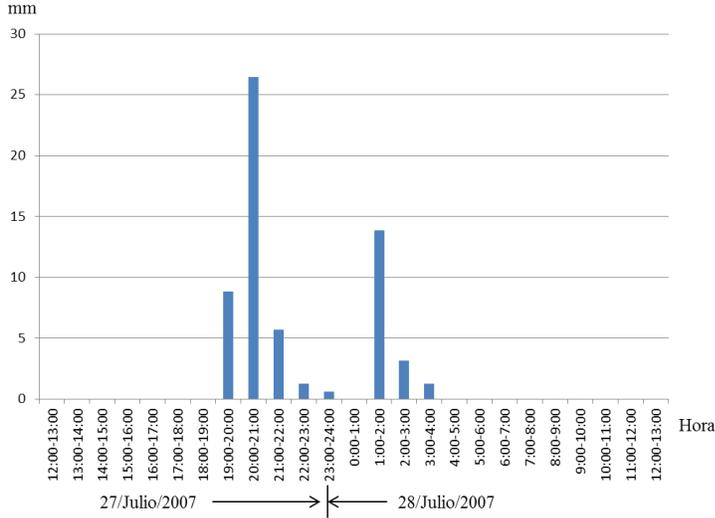


HIETOGRAMAS DE LAS ESTACIONES CONVENCIONALES

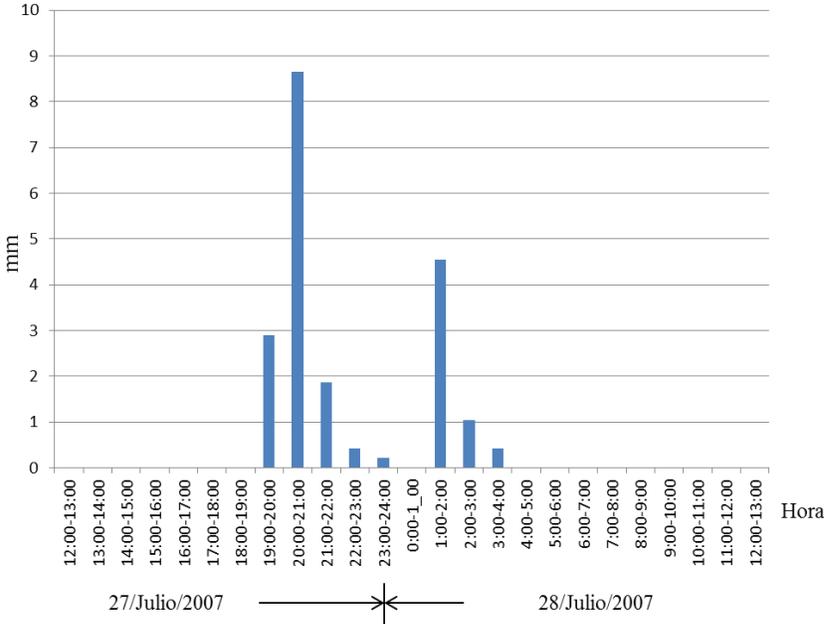
La Saucedá



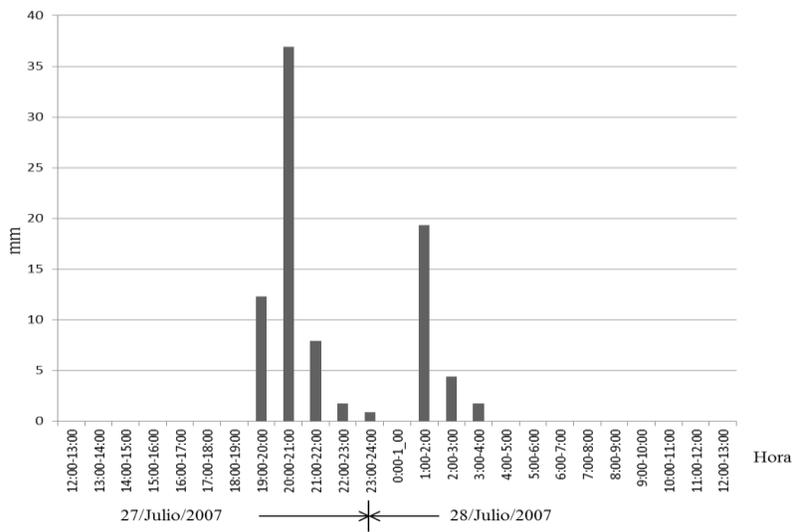
Las Adjuntas



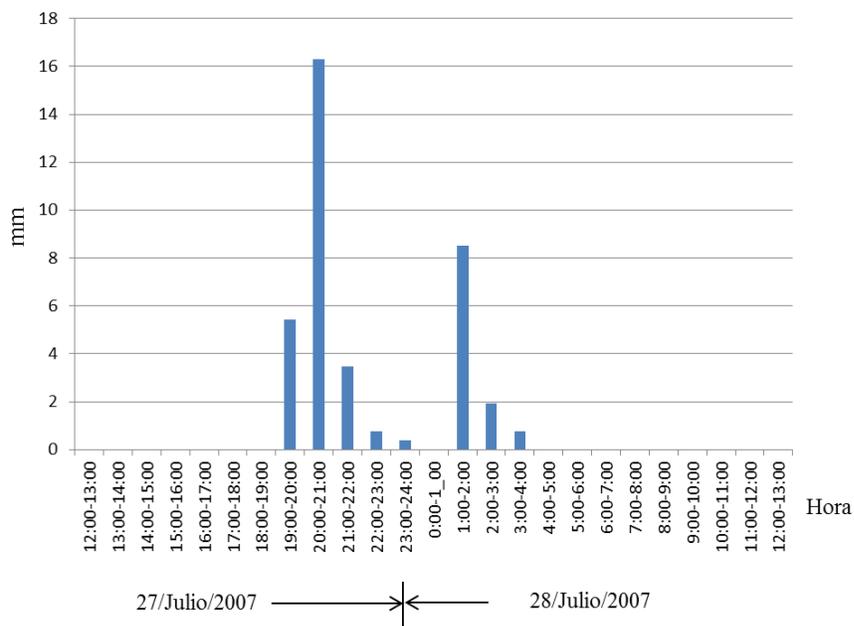
Media Luna



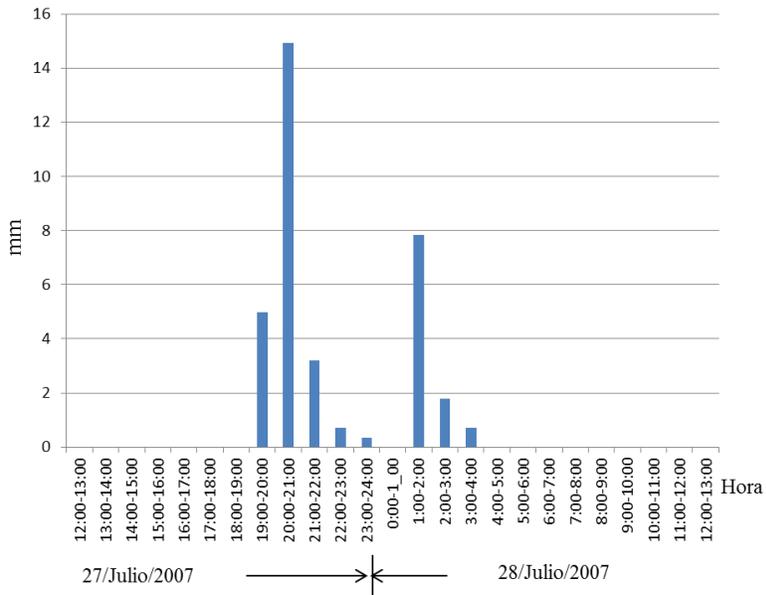
Purísima de Bustos



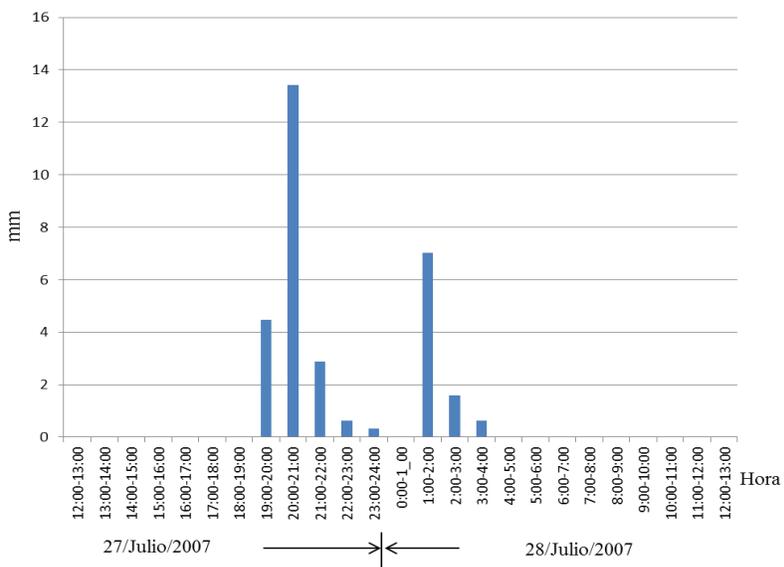
Guanajal



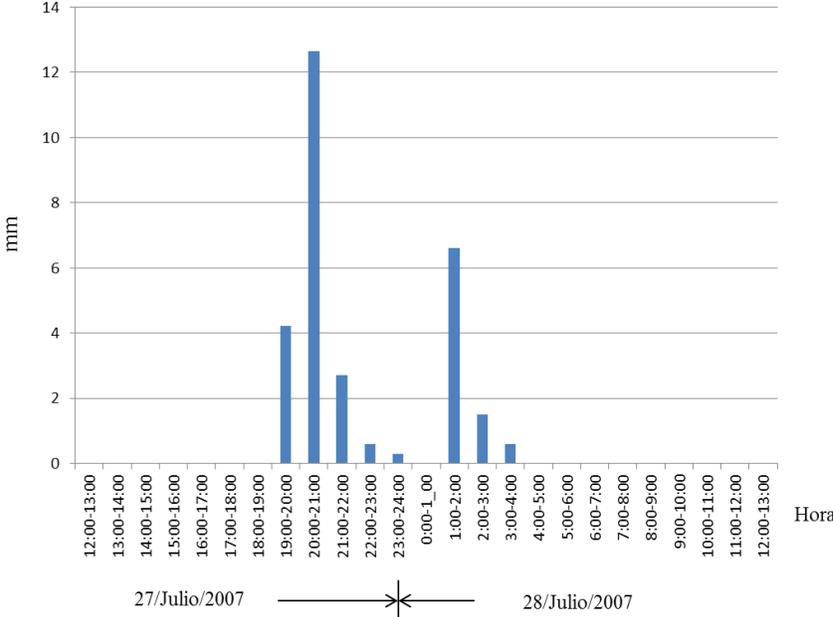
El Palote



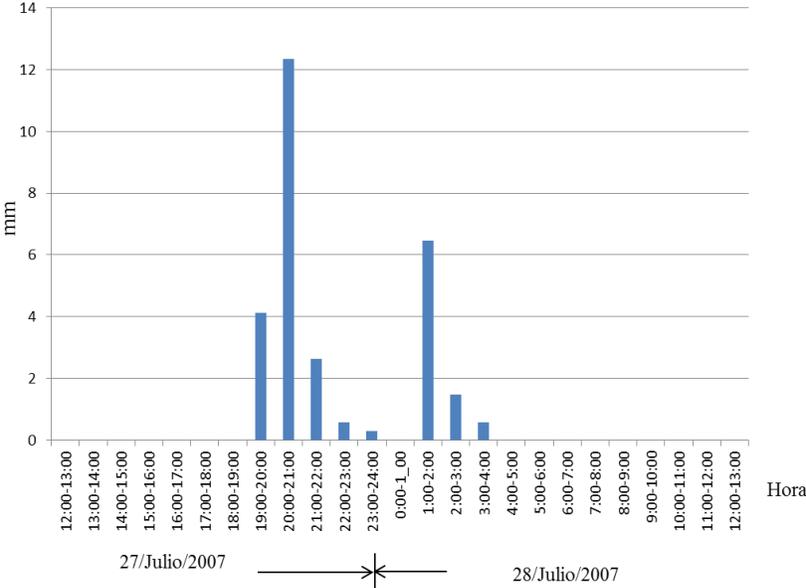
Hacienda de Arriba



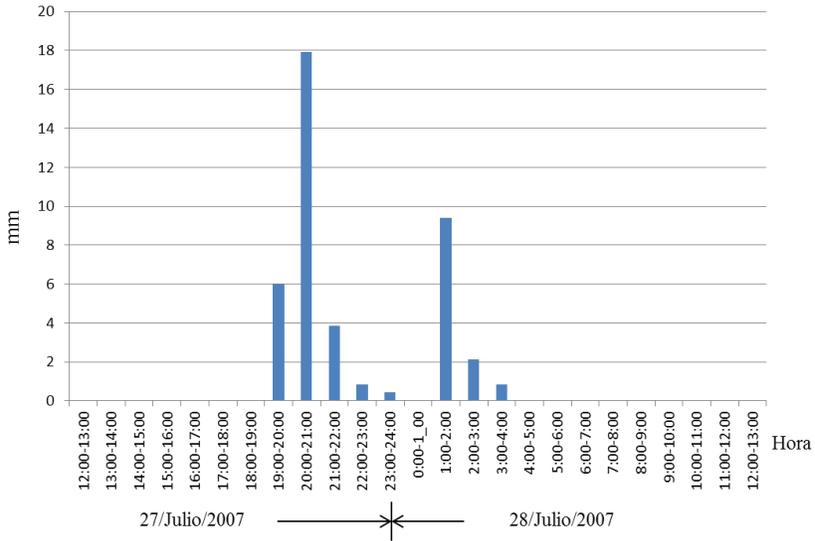
Los Castillos



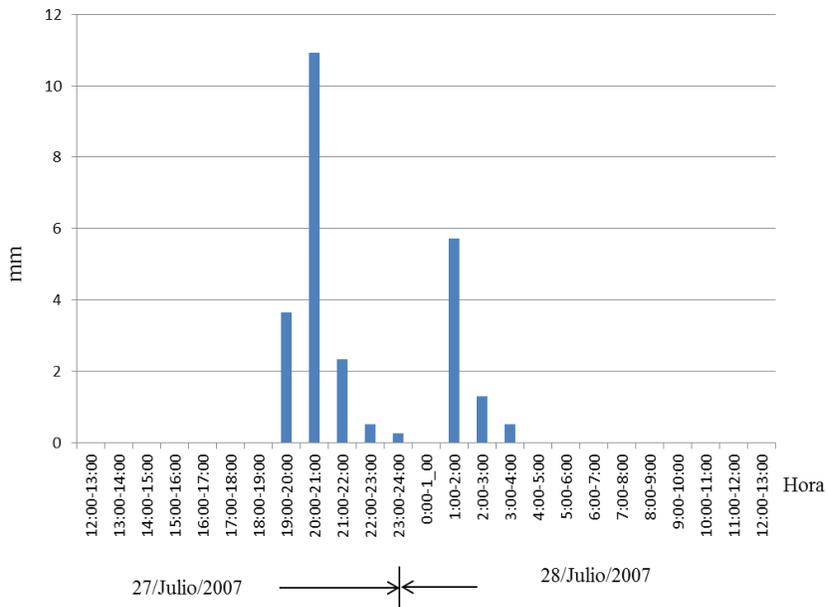
León (La Calzada)



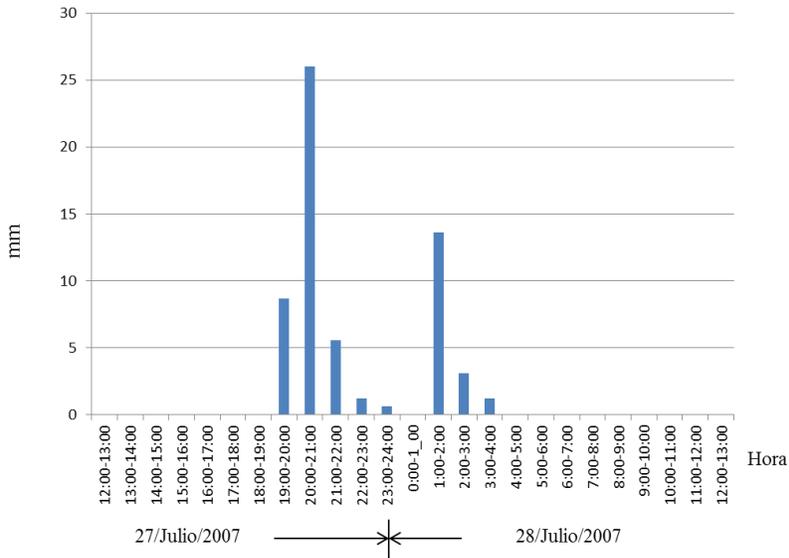
Presa El Barrial



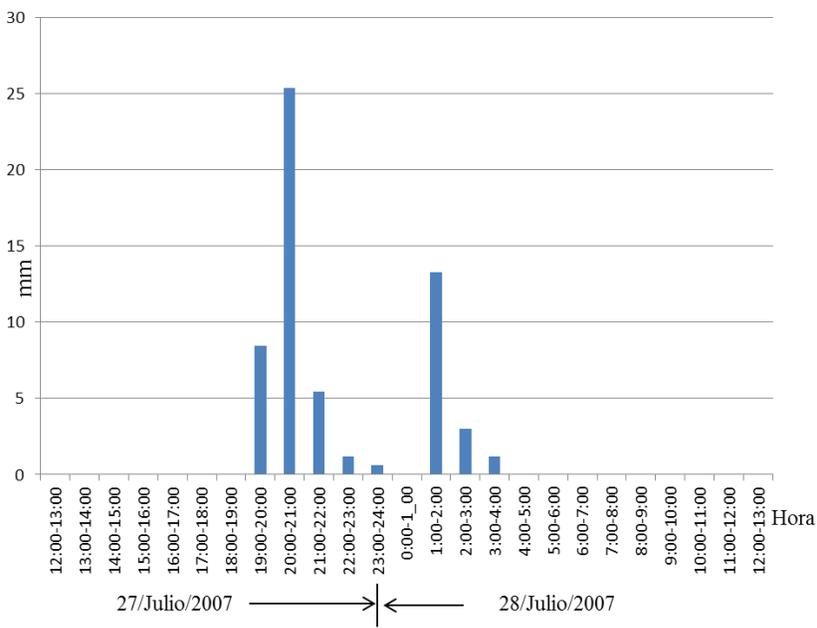
Lagos



San Diego de Alejandría

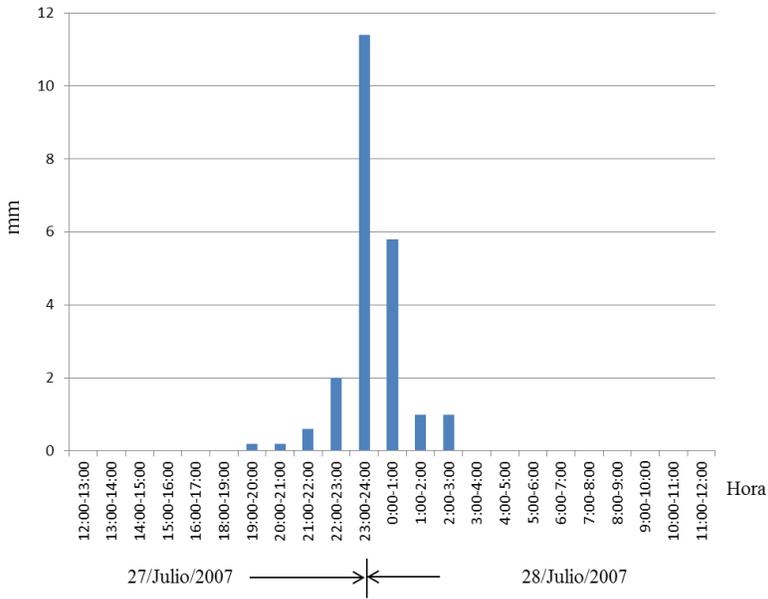


La Vaquera



HIETOGRAMAS DE LAS ESTACIONES AUTOMÁTICAS

El Tigre



La Estancia

