

MODELACIÓN DE ÁREAS DE AFECTACIÓN POR
DESBORDAMIENTO DE RÍOS EN ZONAS DE TRANSICIÓN
FLUVIAL. CASO DEL RÍO LA ANTIGUA, VERACRUZ.

ING. CUAUHTÉMOC HERNÁNDEZ GALENO.



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería

MODELACIÓN DE ÁREAS DE AFECTACIÓN POR
DESBORDAMIENTO DE RÍOS EN ZONAS DE
TRANSICIÓN FLUVIAL. CASO DEL RÍO LA ANTIGUA,
VERACRUZ.

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

MAESTRO EN CIENCIAS
(RECURSOS HÍDRICOS Y AMBIENTAL)

Presenta:

Ing. Cuauhtémoc Hernández Galeno.

Dirigido por:

Dr. Eusebio Jr. Ventura Ramos.

C.U., Santiago de Querétaro, Qro.

Mayo 2014



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Recursos Hídricos y Ambiental

MODELACIÓN DE ÁREAS DE AFECTACIÓN POR DESBORDAMIENTO DE RÍOS
EN ZONAS DE TRANSICIÓN FLUVIAL. CASO DEL RÍO LA ANTIGUA,
VERACRUZ.

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Maestro en Ciencias
(Recursos Hídricos y Ambiental)

Presenta:

Ing. Cuauhtémoc Hernández Galeno

Dirigido por:

Dr. Eusebio Jr. Ventura Ramos

Dr. Eusebio Jr. Ventura Ramos
Presidente

Dr. Nabil Mobayed Khodr
Secretario

Dr. Miguel Ángel Domínguez Cortazar
Vocal

Dr. José Reyes Sánchez
Suplente

M.C. César Augusto Granada Isaza
Suplente

Dr. Aurelio Domínguez González
Director de la Facultad

Firma

Firma

Firma

Firma

Firma

Dr. Irineo Torres Pacheco
Director de Investigación y Posgrado

RESUMEN

Se estudió la distribución de áreas afectadas por desbordamiento de ríos ocurridas en el 2010 en la zona de transición fluvial del río La Antigua en el estado de Veracruz mediante el tránsito de avenidas con el modelo unidimensional HEC-RAS, el objetivo fue evaluar la variabilidad en las predicciones de las superficies afectadas por inundaciones al utilizar cuatro modelos digitales de elevación (MDE) con diferente resolución espacial y fuente de origen. Los modelos digitales de elevación que se utilizaron corresponden a la información topográfica elaborada por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) la cual es la que más se utiliza en la República Mexicana y se encuentra disponible de manera gratuita. Las áreas de inundación simuladas con los cuatro modelos digitales de elevación fueron comparadas con respecto a su superficie mediante la utilización de una medida de bondad de ajuste que considera la superficie en común entre las áreas simuladas y las observadas con respecto al total de estas. Las áreas de inundación observadas se obtuvieron de imágenes de satélite RapidEye tomadas post evento. Los resultados indicaron que con la cartografía LIDAR se obtuvo una mayor superficie de inundación en común con respecto a la observada, siendo su área más similar la generada por el MDE 1:20,000 que con la de los Continuos Nacionales Mexicano (CEM) en sus versiones 2.0 y 3.0, esto a pesar de la fuente de origen de estas últimas, el cual es el mismo (procesos fotogramétricos). Las principales diferencias fueron en las zonas con pocos cambios de elevación como los que se encuentran dentro de los cauces y los cuales no son adecuadamente representados por el MDE 1:20,000 debido a que el MDE fue creado solamente con curvas de nivel equidistantes a 10 m, sin tomar en consideración puntos acotados como bancos de nivel y vértices geodésicos además de las corrientes y cuerpos de agua y en el caso del CEM 2.0 por su escala de representación.

(Palabras clave: Inundaciones, modelos digitales de elevación, simulación hidrológica, HEC-RAS.)

SUMMARY

This study evaluated the distribution of inundated area by flood inundation occurred in the 2010 in the Antigua river in the State of Veracruz with 1D HEC-RAS model. The objective was to evaluate the variability in the predictions of inundated areas using four digital elevation models (DEM) with different spatial resolution and source. The digital elevation models used correspond to the topographic information produced by the Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), which is the most used in Mexico and is available free of charge. Inundated areas were compared with a measure of fit, which considers the surface in common between simulated and observed with respect to the total of these. The observed flood areas were obtained from RapidEye satellite images. The results indicate that with mapping LIDAR was obtained a larger flood in common with respect to the observed surface, being its most similar area generated by 1: 20,000 DEM than with the of the Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM) versions 2.0 and 3.0, this despite the source of origin of the latter, which is the same (photogrammetric processes). The main differences were in areas with few changes in elevation as floodplain and which are not adequately represented by the 1:20,000 DEM because this was obtained through contour lines with 10 m equidistance and in the case of the CEM 2.0 by its scale of representation.

(Key words: floods, digital elevation, hydrologic simulation, HEC-RAS model.)

DEDICATORIAS

A mis Padres:

Rodrigo Hernández Barrera y Eulalia Galeno Velázquez por su cariño y enseñanzas y todos los sacrificios que han realizado para que tanto mis hermanos como yo, podamos tener una formación profesional y un futuro en la vida.

A mis Hermanos:

Gisela, César, Kenia y Carlos por el apoyo incondicional que me han brindado en los momentos que más los he necesitado, así como la confianza y seguridad que me otorgaron de poder lograr mis objetivos y metas planeadas.

A mis Compañer@s y Amig@s:

Marcela, Silvia, Yanet, Antonio, Alex, Denio, Guillermo, Héctor, Israel y Juan porque siempre estuvieron conmigo en los buenos y malos momentos sin esperar nunca nada a cambio, así también pase momentos muy agradables con ellos y que nunca olvidare, por lo cual siempre los recordare.

AGRADECIMIENTOS

A *México* que a través del *Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología* (CONACYT) y de la *Universidad Autónoma de Querétaro* (UAQ) financió y me permitió realizar esta investigación.

Al *Dr. Eusebio Jr. Ventura Ramos*, por el tiempo, apoyo y dirección que me brindó para la realización y culminación de este trabajo, así como también por el apoyo durante mis años de estudiante y pasante y por las oportunidades dadas de desarrollo profesional.

Al *Dr. Nabil Mobayed Khodr, Dr. Miguel Ángel Domínguez Cortazar, M.C. César Augusto Granada Isaza y Dr. José Reyes Sánchez* por sus valiosos comentarios y sugerencias que permitieron mejorar este trabajo de investigación.

A todos los *profesores de la Maestría en Ciencias en Recursos Hídricos y Ambiental*, porque en sus enseñanzas y consejos pude obtener los conocimientos necesarios para mi formación profesional.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	i
SUMMARY	ii
DEDICATORIAS	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
ÍNDICE GENERAL	v
ÍNDICE DE TABLAS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
I. INTRODUCCIÓN	1
I.1. Antecedentes	1
I.2. Justificación	3
I.3. Objetivos e hipótesis	4
I.3.1. Objetivo general	4
I.3.2. Objetivos particulares	4
I.3.3. Hipótesis	4
II. MARCO TEÓRICO	5
II.1. El modelo HEC-HMS	5
II.1.1. Componentes del modelo HEC-HMS	6
II.1.2. Métodos hidrológicos utilizados	9
II.2. El modelo HEC-RAS	13
II.2.1. Perfiles de la superficie de agua para flujo permanente	14
II.2.2. Solución numérica para flujo no permanente	15
II.2.3. Aplicación de las ecuaciones de flujo no permanente con HEC-RAS	22
II.3. Modelos digitales de elevación	25
II.3.1. Datos topográficos para la construcción de MDT	26
II.3.2. Información topográfica disponible en México	28
III. METODOLOGÍA	34
III.1. La cuenca del río La Antigua	34
III.2. Fuentes de información empleadas	37
III.3. Obtención de hidrogramas para la simulación en HEC-RAS	37

III.3.1. Creación del modelo de cuenca	37
III.3.2. Creación del modelo meteorológico	38
III.3.3. Definición de especificaciones de control	39
III.3.4. Simulación	39
III.3.5. Calibración	40
III.4. Obtención de mapas de inundación	40
III.4.1. Creación de trayectorias de ríos (<i>Stream Centerline</i>) y secciones transversales (<i>XS Cut Lines</i>)	41
III.4.2. Preparación de la información y simulación en HEC-RAS	44
III.4.3. Calibración del modelo	45
III.4.4. Obtención de las áreas de inundación	45
III.5. Comparación de las áreas de inundación obtenidas	46
IV. RESULTADOS	47
IV.1. Hidrogramas en HEC-HMS	47
IV.2. Cauces y secciones transversales	48
IV.3. Caudales utilizados y niveles de agua	64
IV.4. Áreas de inundación	66
V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	74
LITERATURA CITADA	76

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
1. Lista de datos de entrada.....	9
2. Métodos hidrológicos utilizados en el HEC-HMS.	9
3. Precipitación registrada el 17 de septiembre de 2010 en las estaciones climatológicas con influencia dentro de la cuenca del río La Antigua.	47
4. Longitudes obtenidas con los diferentes MDE para los ríos simulados.....	49
5. Elevaciones obtenidas con los diferentes MDE en algunos puntos del río La Antigua.	52
6. Elevaciones obtenidas con los diferentes MDE en algunos puntos del río Santa María.	54
7. Elevaciones obtenidas con los diferentes MDE en algunos puntos del río La Bomba.	55
8. Caudales máximos y niveles de agua de la estación hidrométrica 28003.	65
9. Áreas de inundación para el evento ocurrido en septiembre del 2010.	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. Hidrograma Unitario del SCS.	12
2. Volumen de control elemental para la derivación de las ecuaciones de continuidad y momento.	15
3. Ilustración de los términos asociados con la definición de fuerza de presión.	18
4. Flujos en el cauce y llanura de inundación.	23
5. Continuo de Elevaciones Mexicano.	29
6. Disponibilidad de la información topográfica 1:20,000 en la República Mexicana.	30
7. Página de descarga de las cartas topográficas 1:20,000.	31
8. Página de descarga del CEM 3.0.	32
9. Disponibilidad de cartografía LIDAR en la República Mexicana.	33
10. Página de descarga de la cartografía LIDAR.	33
11. Ubicación de la cuenca del río La Antigua.	34
12. Ubicación de los ríos La Antigua, Santa María y La Bomba dentro de la cuenca del río La Antigua.	36
13. Geometría del sistema de subcuencas.	38
14. Polígonos de Thiessen de las estaciones climatológicas con información disponible.	39
15. Esquema metodológico para la obtención de las áreas de inundación.	40
16. Zonas planas y depresiones en modelos digitales de elevación.	41
17. Red de drenaje obtenida a partir de un MDE, a) sin problemas de depresiones y picos y b) con problemas de depresiones y picos.	42
18. Modelos digitales de elevación obtenidos de a) CEM 2.0 escala 1:50,000, b) CEM 3.0 escala 1:20,000, c) Curvas de nivel escala 1:20,000 y d) Cartografía LIDAR escala 1:10,000.	43
19. Errores en la geometría de las secciones.	44
20. Comparativa entre el hidrograma observado y el simulado con HEC-HMS para el punto de control ubicado en la estación hidrométrica Cardel.	48
21. Comparativa de los cauces generados por los diferentes MDE en un área con llanura de inundación.	50
22. Geometría obtenida para el río La Antigua y correspondiente a <i>XS Cut Lines</i> , <i>Stream Centerline</i> y <i>Line Bank</i>	51
23. Perfiles longitudinales del río La Antigua obtenidos con los diferentes MDE.	51
24. Representación del tramo del río La Antigua en donde se identificó el mayor desnivel en las elevaciones del cauce, a) Cartografía LIDAR, b) MDE 1:20,000, c) CEM 3.0 y d) CEM 2.0.	53
25. Perfiles longitudinales del río Santa María obtenidos con los diferentes MDE.	54
26. Perfiles longitudinales del río La Bomba obtenidos con los diferentes MDE.	55
27. Diferencias en las secciones obtenidas con la interpolación en HEC-RAS y las generadas con los MDE en ArcMap para cauces con llanura de inundación: a) poco definida y b) definida.	56

28. Diferencias en las secciones obtenidas con el MDE original y después de la aplicación de la herramienta <i>Fill Sinks</i>	57
29. Tramo del río con información topográfica.	59
30. Sección original y corregida de la cartografía LIDAR en el punto de ubicación de la estación hidrométrica Cardel.	59
31. Sección original y corregida del MDE 1:20,000 en el punto de ubicación de la estación hidrométrica Cardel.	60
32. Sección original y corregida del CEM 3.0 en el punto de ubicación de la estación hidrométrica Cardel.	60
33. Sección original y corregida del CEM 2.0 en el punto de ubicación de la estación hidrométrica Cardel.	61
34. Curvas de nivel 1:20,000 en la sección de la estación hidrométrica Cardel.	62
35. Área hidráulica de las secciones obtenidas de los MDE y después de realizar la corrección del fondo del cauce, para a) Cartografía LIDAR, b) MDE 1:20,000, c) CEM 3.0 y d) CEM 2.0.	63
36. Hidrograma observado del evento de inundación en la estación hidrométrica Cardel.	65
37. Área de inundación delimitada con imágenes de satélite RapidEye en los alrededores de la localidad El Coyolar y Juan Yobal Zerna, municipio de Puente Nacional, Veracruz.	66
38. Casa en la cual se observa hasta donde llegó el nivel del agua producto de la inundación por el desbordamiento del río La Antigua.	66
39. Detalle de las áreas de inundación obtenidas con a) Cartografía LIDAR y b) MDE 1:20,000, en una de las zonas en donde se obtuvo la menor variabilidad de las simulaciones con respecto a las inundaciones observadas.	68
40. Detalle de las áreas de inundación obtenidas con a) CEM 3.0 y b) CEM 2.0, en una de las zonas en donde se obtuvo la menor variabilidad de las simulaciones con respecto a las inundaciones observadas.	69
41. Detalle de las áreas de inundación obtenidas con a) cartografía LIDAR y b) MDE 1:20,000, en una de las zonas en donde se obtuvo la mayor variabilidad de las simulaciones con respecto a las inundaciones observadas.	71
42. Detalle de las áreas de inundación obtenidas con a) CEM 3.0 y b) CEM 2.0, en una de las zonas en donde se obtuvo la mayor variabilidad de las simulaciones con respecto a las inundaciones observadas.	72

I. INTRODUCCIÓN

I.1. Antecedentes

Las inundaciones son un tema con una gran diversidad de estudios y que se desarrollan en diversos países alrededor del mundo. Algunos estudios relacionados a las inundaciones consideran el uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) como herramientas clave para la obtención de la información, tal es el caso del Departamento de Desarrollo Regional y Medio Ambiente de los Estados Unidos (DDRMA, 1991) el cual menciona que los SIG constituyen un medio sistemático para recolectar una gran cantidad de información de distinto tipo sobre la unidad de espacio geográfico de interés, no solo en la evaluación de desastres naturales, sino además en recursos naturales y fenómenos socioeconómicos; consecuentemente puede ayudar a los planificadores a evaluar el impacto de los eventos naturales sobre las actividades de desarrollo existentes o las propuestas.

Debido a él gran interés en el tema de las inundaciones y al desarrollo de nuevas tecnologías asociadas a los SIG, en la actualidad existen una gran variedad de modelos para la obtención de áreas de inundación así como de información con la cual realizar las simulaciones, por lo tanto, los estudios referentes a evaluar este tipo de características han cobrado gran importancia ya que de esta manera se busca identificar los modelos y la información con la cual se obtienen las simulaciones que se asemejan más a la realidad de acuerdo a las condiciones específicas de cada lugar o región. En este aspecto, Horrit y Bates (2001) realizaron un estudio sobre el efecto en el cambio de la resolución espacial de los Modelos Digitales de Elevación (MDE) con respecto a su uso en modelación de inundaciones. El MDE original fue cartografía LIDAR (*Light Detection and Ranging*) con una resolución de 10 m, a partir del cual se obtuvieron seis modelos más (20, 50, 100, 250, 500 y 1000 m) y con los cuales se realizaron simulaciones con el modelo LISFLOOD-FP para un tramo de 60 km del río Severn, en Reino Unido, y finalmente las áreas de inundación modeladas fueron comparadas con inundaciones obtenidas de imágenes de satélite.

Los resultados del estudio de Horrit y Bates (2001), demostraron que el mayor funcionamiento del modelo se alcanzó con una resolución de 100 m, después de la cual no

se observó mejoría con el aumento de la resolución, además se obtuvieron predicciones más exactas en los niveles de agua al aumentar la resolución aunque estas en general fueron buenas hasta una resolución de 500 m.

El estudio realizado por Horrit y Bates en el 2001, solo contempló el cambio en la resolución espacial y no la fuente de obtención, de manera que, otros estudios fueron realizados para estudiar este efecto, como por ejemplo, el de Sanders (2007), el cual comparó diferentes MDE obtenidos a través de internet, con la finalidad de observar cuál de ellos presentaba las mejores características para la simulación de inundaciones y para lo cual utilizó un modelo hidrodinámico bidimensional y mapas existentes de inundaciones observadas para su comparación. Las simulaciones fueron realizadas para el río Santa Clara en California y el río Búfalo en Houston, Texas. Los resultados que obtuvo reflejaron que la cartografía LIDAR fue la que representó la mejor fuente de modelos de terreno debido a su precisión vertical y horizontal, haciendo que estos tengan la ventaja de detectar pequeños obstáculos en el terreno y la vegetación.

Igual a Sanders (2007), Cook y Merwade en 2009 realizaron un análisis comparativo entre las inundaciones obtenidas con cartografía LIDAR y las resultantes de otras seis diferentes topografías, para lo cual, cada conjunto de datos topográficos fueron utilizados para crear mapas de inundación utilizando los modelos 1D HEC-RAS y FESWMS 2D para dos áreas de estudio; el arroyo Strouds en el norte de California y el río Brazos en Texas. Los resultados que obtuvieron indicaron que las áreas de inundación se redujeron considerablemente al aumentar la resolución de los modelos.

De Gonzalo (2011) analizó la influencia de la calidad y resolución de la geometría de entrada en la obtención de áreas de inundación mediante la utilización de los modelos hidrodinámicos HEC-RAS e IBER y aplicado a la cuenca del río Pejibaye en Costa Rica, obteniendo que el efecto de la resolución de los MDE puede llevar a producir resultados, tanto en las variables hidráulicas, como en las superficies de inundación, con un nivel considerable de error, convirtiendo a la topografía en el factor más delicado en la modelación hidrodinámica.

Recientemente, Álvarez *et al* (2012) evaluaron la incertidumbre en la modelación numérica de flujos de inundación en función de la resolución de la malla del MDE para la zona de estudio de la desembocadura del río Tonalá, en el límite de los estados de Veracruz y Tabasco, México, y utilizando el modelo hidrodinámico 2D MIKE 21. Los resultados que obtuvieron indicaron que existe una cierta variabilidad en cuanto al gasto de salida en la desembocadura de acuerdo a la resolución de la malla, apreciándose que si se tiene una alta resolución espacial el flujo tiende a presentar más variaciones respecto al empleo de mallas más gruesas.

I.2. Justificación

Las inundaciones son uno de los desastres naturales que más importancia han cobrado en la actualidad, esto debido a su constante ocurrencia y a las grandes afectaciones que dejan a su paso, ya sea por pérdidas humanas o económicas.

En México, para el periodo de 1999 a 2011 se estiman alrededor de 154 individuos fallecidos anualmente y de 21,368 millones de dólares en pérdidas anuales por causa de fenómenos hidrometeorológicos, entre los cuales se encuentran las inundaciones por desbordamiento de ríos (CENAPRED, 2010).

En este sentido es que surge la necesidad de identificar las áreas que se encuentran en riesgo de ser afectadas por este tipo de desastres con fines de prevención o de evaluación de daños ante un evento hidrometeorológico extremo, siendo el uso de los SIG y los modelos de simulación hidrológica las herramientas clave para ello, sin embargo, debido a él gran interés en este tema, en la actualidad existe una gran cantidad de modelos para la obtención de áreas de inundación así como de información con la cual realizar las simulaciones por lo cual surgen diversas preguntas como: ¿Qué modelo es mejor para las condiciones de determinada área de estudio? y ¿Qué tanto afecta la obtención de áreas de inundación si se utiliza determinada información?. La búsqueda de respuestas a estas preguntas ha llevado a la realización de diversos estudios enfocados a la evaluación de los modelos de simulación hidrodinámica o hidrológica así como de las variables de entrada para la realización de las simulaciones, de forma tal que se logre identificar con cuál de ellos se obtienen las

modelaciones que se asemejan más a la realidad de acuerdo a las condiciones específicas de cada lugar o región.

I.3. Objetivos e hipótesis

I.3.1. Objetivo general

Evaluar la variabilidad en las predicciones de las superficies afectadas por inundaciones mediante el modelo HEC-RAS y utilizando cuatro modelos digitales de elevación de diferente resolución y fuente de obtención.

I.3.2. Objetivos particulares

Evaluar la obtención de áreas de inundación con el modelo HEC-RAS en áreas de transición fluvial.

Identificar los alcances de la información topográfica existente en la República Mexicana con fines de simulación de áreas de inundación.

I.3.3. Hipótesis

La modelación de áreas afectadas por desbordamiento de ríos mediante la utilización de diferentes tipos de topografía permite definir el alcance del uso de esta información aunado a cuestiones de prevención y/o cuantificación de daños por inundaciones.

II. MARCO TEÓRICO

II.1. El modelo HEC-HMS

En los estudios referentes a inundaciones, uno de los principales elementos a ser considerados es el cálculo de la escorrentía así como el tránsito de esta a través del suelo y los cauces, ya que de esto dependerá que se presente una inundación o no así como la magnitud con la que ocurrirá. De acuerdo a Sánchez (2012), el proceso completo de calcular la escorrentía que producirá una precipitación determinada es muy complejo por lo cual para afrontar este tipo de problemas en casos reales se debe acudir a modelos de ordenador.

Básicamente, hay dos familias de modelos que hacen la tarea de calcular el hidrograma generado en una cuenca: Modelos que simulan un suceso puntual y Modelos de simulación continua.

Los Modelos que simulan un suceso puntual necesitan datos de la precipitación, más las características físicas de las diversas subcuencas. Los Modelos de simulación continua por otro lado además de necesitar la serie continua de precipitaciones, deben computar la evapotranspiración, fusión de la nieve, flujo subsuperficial en la zona saturada, etc.

En la actualidad, uno de los modelos que más se utiliza es el HEC-HMS (*Hydrologic Modeling System* desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros de la Armada de Estados Unidos) el cual utiliza métodos de precipitación-escorrentía para estimar los hidrogramas de escorrentía directa generados por las precipitaciones en una cuenca o región durante un período especificado, además, es un programa muy flexible que permite al usuario la selección de diferentes métodos para el cálculo de pérdidas, hidrogramas, flujo base y propagación en cauces. Posibilita realizar simulaciones de los procesos hidrológicos a nivel de eventos o en forma continua. Los primeros simulan el comportamiento de un sistema hídrico durante un evento de precipitación. La simulación continua puede comprender un período de tiempo con varios de estos eventos (Estrada y Pacheco, 2012).

II.1.1. Componentes del modelo HEC-HMS

Para simular la respuesta hidrológica de una cuenca, el HEC-HMS utiliza cuatro componentes: modelo de la cuenca, modelo meteorológico, especificaciones de control y datos de entrada. Una simulación calcula la transformación de lluvia a caudal en el modelo de la cuenca, dada la entrada del modelo meteorológico. Las especificaciones de control definen el periodo de tiempo durante el cual se realizará la simulación y el intervalo de tiempo a utilizar. Los componentes de los datos de entrada, tales como las series temporales, tablas y datos por celdas, son requeridos como parámetros o condiciones de contorno tanto en el modelo de la cuenca como en el meteorológico (Nanía, 2007).

Modelo de la cuenca

El modelo de cuenca es utilizado para representar la parte física de la cuenca. El usuario desarrolla un modelo de cuenca agregando y conectando los siguientes elementos hidrológicos:

- Subcuenca (*Subbasin*): El elemento subcuenca es utilizado para representar la parte física de la cuenca. Dada la precipitación, el caudal de salida de la subcuenca es calculado restando las pérdidas de precipitación, y transformando el exceso de precipitación en caudal de salida sumándole el gasto base.
- Canal (*Reach*): Este elemento es utilizado para trasladar el flujo aguas abajo en el modelo de cuenca. El gasto de entrada a este elemento puede venir de uno o más elementos aguas arriba. El flujo de salida es calculado en base al tránsito y la atenuación del hidrograma de entrada.
- Unión (*Junction*): Una unión se utiliza para unir el caudal proveniente de uno o más elementos hidrológicos. El caudal de salida es calculado simplemente sumando todas las entradas y asumiendo que no existe almacenamiento en la unión.
- Fuente (*Source*): Este elemento se utiliza para introducir caudal en la cuenca, no tiene entradas, el gasto de salida es definido por el usuario.

- Salida (*Sink*): El elemento salida es utilizado para representar la salida de la cuenca. El gasto de entrada a este elemento puede venir de uno o más elementos. No hay gasto de salida en este elemento.
- Reservorio (*Reservoir*): El reservorio se utiliza para modelar la detención y atenuación de un hidrograma causada por un reservorio, estanque de detención, embalse. El gasto de entrada puede venir de uno o más elementos hidrológicos. El caudal de salida puede ser calculado de tres formas. El usuario puede definir tablas de; almacenamiento-descarga, elevación-almacenamiento-descarga, altura-área-descarga. Se puede introducir también una relación entre la elevación y el almacenamiento o la elevación y el área y definir una o más estructuras de salida, o especificar una serie de tiempo de caudal de salida.
- Desviación (*Diversion*): En este elemento se modela el caudal que deja el canal principal. La entrada puede venir de uno o más elementos. La salida es de dos tipos, el caudal desviado, y el caudal que no es desviado, el desviado es calculado utilizando información de entrada, y cada una de estas salidas puede ser conectada a elementos hidrológicos.

Con estos siete componentes, el usuario puede elaborar una cuenca tan compleja como requiera el problema que esté tratando y de acuerdo a la información de campo disponible. Si se cuenta con información digital de campo, el HMS incluye la opción de trabajar la cuenca con subdivisiones en grillas o celdas, cada una de las cuales almacena información pertinente respecto a la precipitación, área, pendientes y condición de humedad del suelo.

Modelo meteorológico

El modelo meteorológico calcula la precipitación requerida en una subcuenca. Se puede utilizar precipitación puntual o por grillas, tiene la capacidad de modelar precipitación sólida y líquida junto con evapotranspiración. También posee un método de cálculo de derretimiento de nieve utilizando un algoritmo de temperatura. Los métodos para la evapotranspiración incluyen el promedio mensual, el método de Priestel y Taylor, y el mismo

método en forma de grilla. Los métodos utilizados en el modelo meteorológico son los siguientes:

- Tormenta de frecuencia (*Frequency Storm*): Se usa para desarrollar un evento de precipitación donde los volúmenes correspondientes a distintas duraciones tienen una probabilidad de excedencia consistente.
- Pluviómetro con pesos (*Gage Weights*): Este método aplica pesos definidos por el usuario a los pluviómetros que el mismo desee.
- Precipitación por grilla (*Gridded Precipitation*): Este método permite el uso de precipitación por grilla, tal como puede ser la proveniente de un radar meteorológico.
- Inverso de la distancia (*Inverse Distance*): Este método calcula el promedio en la subcuenca aplicando la ecuación del inverso de la distancia al cuadrado para las estaciones definidas por el usuario.
- Tormenta del SCS (*SCS Storm*): Este método aplica una distribución temporal tipo SCS a un volumen total de lluvia en 24 horas.
- Hietograma especificado (*Specified Hyetograph*): Este método aplica un hietograma definido por el usuario a un elemento de subcuenca.
- Tormenta estándar de proyecto (*Standard Project Storm*): Este método aplica una distribución en el tiempo a un valor de precipitación dado.

Especificaciones de control

Las especificaciones de control se refieren al tiempo de duración de la simulación, incluyendo también fecha y hora de comienzo y fin del proyecto e intervalo de cálculo. El intervalo de tiempo define el intervalo de cálculo del programa, este intervalo debe ser pequeño, si es mayor que el 29% del t_{lag} de la cuenca, la corrida del software se interrumpe.

Datos de entrada

El programa requiere como datos de entrada: series temporales, pares de datos y datos por celdas en dependencia del estudio a realizar. Estos se introducen como parámetros o condiciones de contorno en el modelo de la cuenca y en el meteorológico. En la Tabla 1 se

presenta una lista de los posibles datos de entrada. Los mismos se pueden introducir de forma manual o mediante un registro creado por un fichero HEC-DSS (*HEC-Data Storage System*).

Tabla 1. Lista de datos de entrada.

Series temporales de datos	Pares de datos	Datos por celdas
<ul style="list-style-type: none"> • Pluviometría • Hidrógrafos • Niveles • Temperatura • Radiación solar • Coeficientes de cultivo 	<ul style="list-style-type: none"> • Funciones almacenamiento - caudal • Funciones cota - almacenamiento • Funciones cota - área • Funciones cota - caudal • Funciones caudal - derivación • Secciones transversales • Hidrograma unitario • Curvas porcentaje • Funciones de fusión de nieve • Patrones de tasa de fusión de nieve 	<ul style="list-style-type: none"> • Precipitación • Temperatura • Radiación solar • Coeficiente de cultivo • Capacidad de almacenamiento • Tasa de percolación • Coeficientes de almacenamiento • Déficit de humedad • Área impermeable • Numero de curvas CN SCS • Cotas • Equivalente de agua nieve • Contenido del agua • Tasa de fusión de nieve

II.1.2. Métodos hidrológicos utilizados

Los elementos hidrológicos usan métodos de cálculo para describir los procesos físicos que se producen en la cuenca (pérdida, transformación de lluvia-caudal y flujo base), mientras que con relación a los tramos de los cauces se emplean métodos de cálculos relativos a la propagación de caudales. Los métodos hidrológicos que incluye el modelo HEC-HMS se presentan en la Tabla 2 y los principales para cada una de las fases de cálculo se describen a continuación.

Tabla 2. Métodos hidrológicos utilizados en el HEC-HMS.

Pérdidas (<i>Loss</i>)	Transformación (<i>Transform</i>)	Flujo Base (<i>Baseflow</i>)	Tránsito (<i>Routing</i>)
<i>Deficit and constant</i>	<i>Clark Unit Hydrograph</i>	<i>Bounded Recession</i>	<i>Kinematic Wave</i>
<i>Exponential</i>	<i>Kinematic Wave</i>	<i>Constant Monthly</i>	<i>Lag</i>
<i>Green and Ampt</i>	<i>ModClark</i>	<i>Linear Reservoir</i>	<i>Modified Puls</i>
<i>Initial and constant</i>	<i>SCS Unit Hydrograph</i>	<i>Nonlinear</i>	<i>Muskingum</i>
<i>SCS Curve Number</i>	<i>Snyder Unit Hydrograph</i>	<i>Boussinesq</i>	<i>Muskingum-Cunge</i>
<i>Smith Parlange</i>	<i>S-Graph</i>	<i>Recession</i>	<i>Straddle-Stager</i>
<i>Soil Moisture Accounting</i>	<i>Unit Hydrograph</i>		

Método número de curva del SCS

El método número de curva del Servicio de Conservación del Suelo de los Estados Unidos (SCS), estima el exceso de precipitación como una función de la precipitación acumulada, cobertura del suelo, uso del suelo, y humedad antecedente del suelo, usando la ecuación siguiente:

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + 6} \quad (1)$$

Donde P_e es el exceso de precipitación acumulada en el tiempo t , P es la profundidad de la lluvia acumulada en el tiempo t , I_a es la abstracción inicial (pérdida inicial), S la retención potencial máxima.

A partir del análisis de muchos resultados experimentales en cuencas pequeñas, el SCS desarrolló una relación empírica para determinar la pérdida inicial (I_a) y la retención potencial máxima (S):

$$I_a = 0.2S \quad (2)$$

Por consiguiente, el exceso acumulativo en el tiempo t es:

$$P_e = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad (3)$$

El exceso incrementado para un intervalo de tiempo es calculado como la diferencia entre el exceso acumulado al final y comienzo del período.

La retención potencial máxima, (S), y las características de la cuenca están relacionadas a través de un parámetro intermedio, el número de curva (CN) mediante:

$$S = 254 \left(\frac{100}{CN} - 1 \right) \quad (4)$$

El SCS ha propuesto valores de CN tabulados en función del tipo y uso del suelo, de modo que para cuencas heterogéneas se puede calcular un valor compuesto (ponderado).

Método del Hidrograma Unitario (HU) del SCS

El SCS propone un método de hidrograma unitario paramétrico. El método se basa en los promedios del hidrograma unitario derivado de la lluvia y el escurrimiento medido para un gran número de cuencas agrícolas pequeñas a todo lo largo de los EE.UU.

El método del hidrograma unitario del SCS se basa en un hidrograma pico adimensional (Figura 1). Este hidrograma adimensional expresa la descarga del hidrograma unitario (Q_t) como una proporción en la descarga pico del hidrograma (Q_p) para cualquier tiempo t . Una fracción de T_p es el tiempo pico para el hidrograma unitario.

Las investigaciones del SCS sugieren que el pico del hidrograma unitario y el tiempo del pico del hidrograma están relacionados por:

$$Q_p = C \frac{A}{T_p} \quad (5)$$

Donde A es el área de la cuenca, C la constante de conversión (2.08 en Sistema Internacional y 484 en el Sistema Inglés de Unidades).

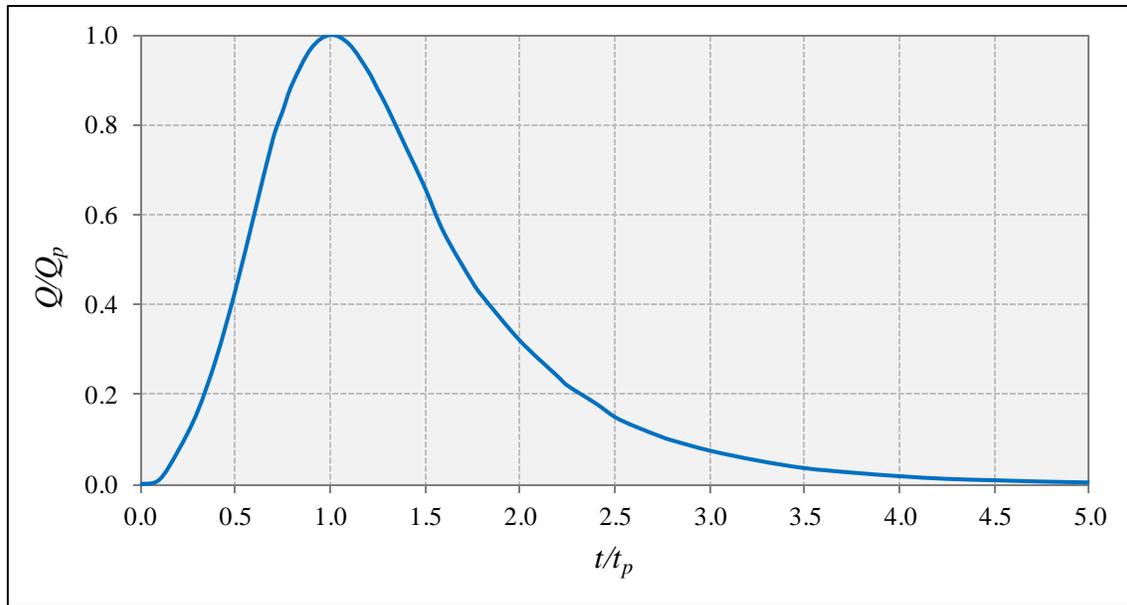


Figura 1. Hidrograma Unitario del SCS.

El tiempo pico (también conocido como el tiempo de subida) es relacionado con la duración de la unidad de precipitación en exceso como:

$$T_p = \frac{\Delta t}{2} + t_{lag} \quad (6)$$

Donde Δt es la duración de la precipitación en exceso (la cuál es también el intervalo de cálculo en el HEC-HMS), t_{lag} el tiempo definido como la diferencia entre el tiempo del centro de masa de exceso de lluvia y el pico del hidrograma unitario.

Para la definición adecuada de las ordenadas en la extremidad naciente del hidrograma unitario del SCS, debe ser usado un intervalo de cálculo, Δt , que sea menos de un 29 % de t_{lag} (Feldman, 2000).

Cuando el tiempo lag es especificado, el HEC-HMS soluciona la Ecuación 6 para encontrar el tiempo pico del hidrograma unitario, y la Ecuación 5 para encontrar el pico del hidrograma. Cuando Q_p y T_p son conocidos, el hidrograma unitario puede ser encontrado de la forma adimensional, lo cual es incluido en el HEC-HMS, por la multiplicación.

II.2. El modelo HEC-RAS

De acuerdo a Triviño y Ortiz (2004) simular el comportamiento de una cuenca hidrológica con la ayuda de un modelo matemático cobra sentido cuando la información obtenida con el mismo resulta imprescindible para lograr un objetivo difícilmente alcanzable por otros medios menos costosos. Un argumento que justifica el estudio hidrodinámico de los ríos es el análisis del riesgo de inundación.

Los modelos facilitan la manipulación de las variables que intervienen en el proceso de conversión lluvia – caudal, aportando datos sobre la distribución espacial de la escorrentía superficial y mejorando la calidad de la cartografía temática sobre zonas inundables y zonas con riesgo de inundación. Durante las últimas décadas, la gestión del riesgo de inundación ha venido demandando con un mayor peso la estimación de áreas de inundación causadas por inundaciones de diferentes periodos de retorno, o bajo diferentes escenarios futuros de simulación, asociados con cambios en las variables ambientales.

Los avances en las técnicas de teledetección y la proliferación y la popularización de modelos informáticos de tipo hidrodinámico, ha permitido que este tipo de modelización se convierta en una herramienta atractiva y accesible, que puede complementar las observaciones históricas, o incluso constituir una alternativa cuando éstas no son suficientes, para predecir los daños potenciales de futuros eventos de inundación (Hunter, 2007).

De acuerdo a Garrido (2012), los modelos hidrodinámicos 1D son ampliamente usados, estos modelos están basados en las ecuaciones de San Venant (leyes de conservación de la masa y momento) para calcular la superficie libre del agua para flujo estacionario y no estacionario en canales abiertos. Estas ecuaciones diferenciales parciales se resuelven mediante discretización numérica, usando frecuentemente el método de diferencias finitas, y en algunos casos mediante elementos finitos o volúmenes finitos, en un esquema implícito. Por otra parte, en los modelos hidrodinámicos 2D las ecuaciones de conservación de la masa y momento son expresadas en dos dimensiones y los resultados se calculan en cada punto de la malla en el dominio de solución. Los modelos 2D pueden resolverse usando el método de los elementos finitos.

Dentro de los modelos hidrodinámicos se encuentra el HEC-RAS el cual fue desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos y que de acuerdo a CENAPRED (2011) es el modelo 1D que más se utiliza en la actualidad debido a las siguientes características:

- Es un modelo ampliamente conocido y por ende está validado
- Es público, lo que significa que no tiene ningún costo y
- Pese a que es un modelo unidimensional, en la mayoría de los casos esta hipótesis no tiene mayores repercusiones.

El modelo hidráulico HEC-RAS, según Rodríguez *et al.* (2007) al ser parte de la familia de modelos HEC, es también un modelo de uso libre, ampliamente utilizado para realizar la modelación hidráulica de canales naturales y artificiales bajo condiciones de flujo permanente y no permanente, y regímenes de flujo subcrítico, crítico, supercrítico y mixto.

II.2.1. Perfiles de la superficie de agua para flujo permanente

En HEC-RAS para el caso de flujo permanente la solución se realiza a través del método del paso estándar (Brunner, 2010):

$$Z_2 + Y_2 + \frac{a_2 V_2^2}{2g} = Z_1 + Y_1 + \frac{a_1 V_1^2}{2g} + h_e \quad (7)$$

Donde Z_1 , Z_2 son las elevaciones de la solera en la sección i , Y_1 y Y_2 es la profundidad del agua en las secciones transversales, V_1 y V_2 son las velocidades promedio, a_1 y a_2 son coeficientes de ponderación que depende de la velocidad, g es la aceleración por la gravedad y h_e es la pérdida de energía en el tramo entre las secciones 1 y 2.

La pérdida de energía (h_e) entre dos secciones transversales se compone de las pérdidas por fricción y las pérdidas por contracción o expansión. La ecuación para la pérdida de carga de energía es la siguiente:

$$h_e = L\bar{S}_f + C \left| \frac{a_2 V_2^2}{2g} - \frac{a_1 V_1^2}{2g} \right| \quad (8)$$

Donde L es la longitud entre las secciones 1 y 2, \bar{S}_f es la pendiente de fricción representativa entre las dos secciones y C es el coeficiente de pérdida por contracción o expansión.

II.2.2. Solución numérica para flujo no permanente

Las leyes físicas que gobiernan el flujo de agua en un río son: el principio de conservación de la masa (continuidad) y el principio de conservación del momento. Desde el punto de vista matemático, esas leyes se expresan en forma de ecuaciones diferenciales, a las que se refiere como ecuaciones de continuidad y de momento (Brunner, 2010).

Ecuación de continuidad

Considerando el volumen de control elemental que se muestra en la Figura 2, la distancia x se mide a lo largo del cauce. En el punto medio del volumen de control se indican el caudal de flujo y el área, $Q(x, t)$ y A_r respectivamente. El área total de flujo es la sumatoria del área activa A y del área S de almacenamiento fuera del cauce.

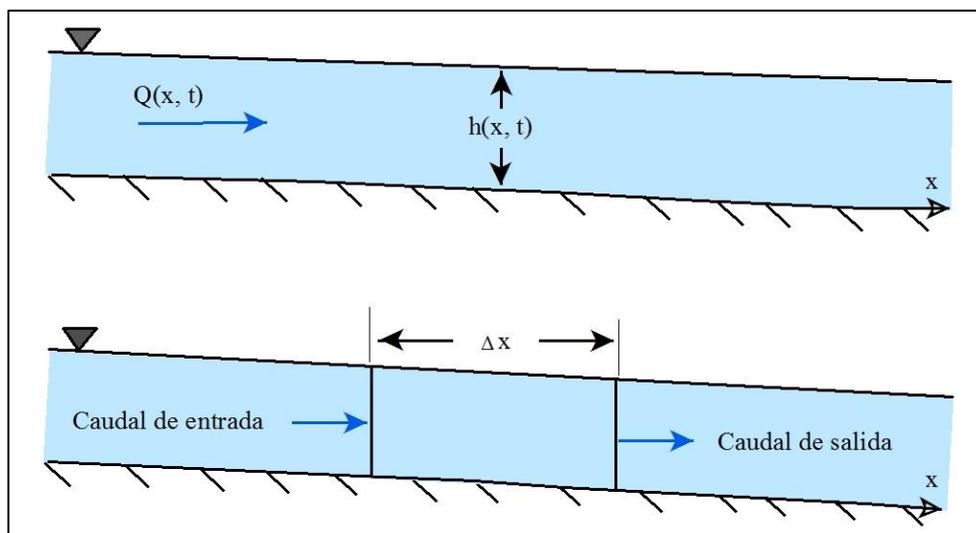


Figura 2. Volumen de control elemental para la derivación de las ecuaciones de continuidad y momento.

La conservación de la masa en función del volumen de control plantea que el gasto neto en el volumen será igual a la rapidez de cambio de almacenamiento dentro del volumen. El caudal de ingreso al volumen de control puede expresarse como:

$$Q - \frac{\partial Q}{\partial x} \cdot \frac{\Delta x}{2} \quad (9)$$

Y el caudal de salida como:

$$Q + \frac{\partial Q}{\partial x} \cdot \frac{\Delta x}{2} \quad (10)$$

La rapidez de cambio en almacenamiento será:

$$\frac{\partial A_T}{\partial t} \cdot \Delta x \quad (11)$$

Asumiendo que Δx es pequeña, la variación de la masa en el volumen de control sería igual a:

$$\rho \cdot \frac{\partial A_T}{\partial t} \cdot \Delta x = \rho \left[\left(Q - \frac{\partial Q}{\partial x} \cdot \frac{\Delta x}{2} \right) - \left(Q + \frac{\partial Q}{\partial x} \cdot \frac{\Delta x}{2} \right) + Q_1 \right] \quad (12)$$

Donde Q_1 es el flujo lateral que entra al volumen de control y ρ es la densidad del líquido. La simplificación y división por ρx nos da la forma definitiva de la ecuación de continuidad para régimen no permanente:

$$\frac{\partial A_T}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q_1 = 0 \quad (13)$$

En la cual q_1 constituye el caudal de aporte lateral por unidad de longitud.

Ecuación de momento

La segunda ley de Newton expresa la conservación del momento como:

$$\sum F_x = \frac{dM}{dt} \quad (14)$$

La conservación del momento para el volumen de control plantea que el régimen neto de momento que entra al volumen (flujo de momento) más la suma de todas las fuerzas externas que actúan sobre el volumen será igual a la rapidez de variación del momento. Esta es una ecuación vectorial aplicada en la dirección x . El flujo de momento F es la masa del líquido por el vector de velocidad en la dirección del flujo. Existen tres fuerzas a considerar: presión, gravedad y fuerza de fricción.

Fuerzas de presión: La Figura 3 ilustra el caso general de una sección transversal irregular. Se asume que la distribución de presión es hidrostática (la presión varía linealmente con la profundidad) y la fuerza de presión total es el integral del producto presión-área sobre la sección transversal. A partir de Shames (1962), la fuerza de presión en cualquier punto puede expresarse como:

$$F_p = \int_0^h \rho g (h - y) T(y) dy \quad (15)$$

Donde h es la profundidad, y la distancia medida desde el fondo del cauce y $T(y)$ una función de ancho que relaciona el ancho de la sección transversal con la distancia sobre el fondo del cauce.

Si F_P es la fuerza de presión ejercida en la dirección x del punto medio del volumen de control, entonces la fuerza en el extremo aguas arriba del volumen de control podría expresarse de la siguiente manera:

$$F_p - \frac{\partial F_p}{\partial x} \cdot \frac{\Delta x}{2} \quad (16)$$

Y en el extremo aguas abajo como:

$$F_P + \frac{\partial F_P}{\partial x} \cdot \frac{\Delta x}{2} \quad (17)$$

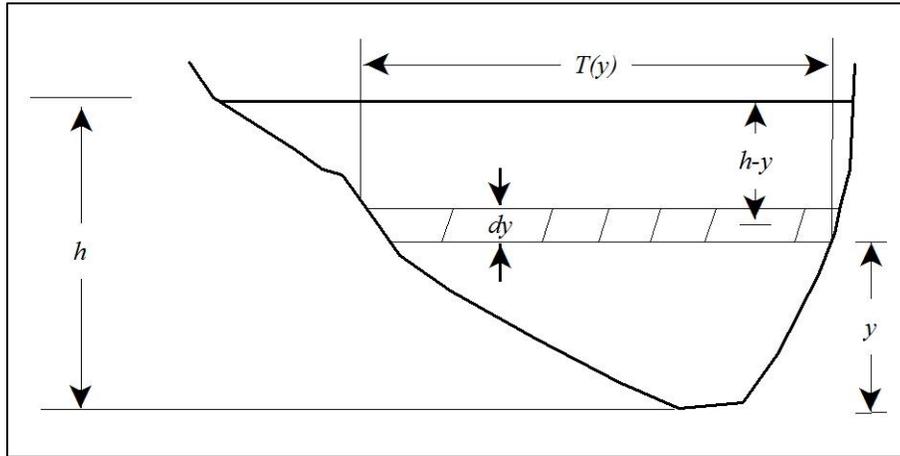


Figura 3. Ilustración de los términos asociados con la definición de fuerza de presión.

Por lo tanto, la suma de las fuerzas de presión para el volumen de control se expresa como:

$$F_{Pn} = \left| F_P - \frac{\partial F_P}{\partial x} \cdot \frac{\Delta x}{2} \right| - \left| F_P + \frac{\partial F_P}{\partial x} \cdot \frac{\Delta x}{2} \right| + F_B \quad (18)$$

Donde F_{Pn} es la fuerza de presión neta para el control de volumen y F_B es la fuerza que ejercen las riberas sobre el líquido en la dirección x . Esto podría simplificarse de la siguiente forma:

$$F_{Pn} = -\frac{\partial F_P}{\partial x} \cdot \Delta x + F_B \quad (19)$$

Al diferenciar la Ecuación 15 mediante el empleo de la Regla de Liebnitz y luego realizar las sustituciones en la Ecuación 19 se obtiene lo siguiente:

$$F_{pn} = -\rho g \Delta x \left[\frac{\partial h}{\partial x} \cdot \int_0^h T(y) dy + \int_0^h (h-y) \frac{\partial T(y)}{\partial x} \cdot dy \right] + F_B \quad (20)$$

La primera integral en la Ecuación 20 es el área de la sección transversal, A . La segunda integral (multiplicado por $-\rho g \Delta x$) es la fuerza de presión ejercida por el líquido sobre las riberas, que es exactamente igual en magnitud, pero opuesta en dirección, a F_B . De aquí que la fuerza de presión neta pueda expresarse como:

$$F_{pn} = -\rho g A \frac{\partial h}{\partial x} \cdot \Delta x \quad (21)$$

Fuerza gravitacional: La fuerza de gravedad ejercida sobre el líquido en el volumen de control y en la dirección x es:

$$F_g = \rho g A \sin \theta \cdot \Delta x \quad (22)$$

En este caso θ es el ángulo que forma el fondo del cauce con la horizontal. Cuando se trata de ríos naturales θ es pequeña y $\sin \theta \approx \tan \theta = -\theta \partial Z_0 / \partial X$, donde Z_0 es la elevación del fondo. Por tanto, la fuerza gravitacional se expresa como:

$$F_g = -\rho g A \frac{\partial z_0}{\partial x} \cdot \Delta x \quad (23)$$

Esta fuerza será positiva para pendientes de lechos negativos.

Fuerza de fricción: Las fuerzas de fricción entre el cauce y el líquido pueden expresarse como:

$$F_f = -\tau_0 P \Delta x \quad (24)$$

Donde τ_0 es el esfuerzo cortante medio del contorno (fuerza/área unitaria) que actúa sobre el perímetro, y P es el perímetro anegado. El signo negativo indica que, con el flujo en la dirección x positiva, la fuerza actúa en la dirección x negativa. De acuerdo con el análisis dimensional τ_0 puede expresarse en términos de coeficiente de arrastre, C_D , de la siguiente manera:

$$\tau_0 = \rho C_D V^2 \quad (25)$$

El coeficiente de arrastre se relaciona con el coeficiente Chezy C de la siguiente forma:

$$C_D = \frac{g}{C^2} \quad (26)$$

Además, la ecuación Chezy puede escribirse así:

$$V = C \cdot \sqrt{R \cdot S_f} \quad (27)$$

Al sustituir las Ecuaciones 25, 26 y 27 por la 24 y llevar a cabo la simplificación, se obtiene la siguiente expresión para el límite de la fuerza de arrastre:

$$F_f = -\rho g A \cdot S_f \Delta x \quad (28)$$

Donde S_f es la pendiente de fricción, que resulta positivo para el flujo en la dirección x positiva. La pendiente de fricción debe relacionarse con el flujo y la altura.

Tradicionalmente se han empleado las ecuaciones de fricción de Manning y Chezy. Como la ecuación de Manning es la más usada, su uso también se extiende a HEC-RAS. La ecuación de Manning se plantea de la siguiente manera:

$$S_f = \frac{Q|Q|n^2}{2.208R^{4/3} \cdot A^2} \quad (29)$$

Donde R es el radio hidráulico y n es el coeficiente de fricción de Manning.

Flujo de momento: Una vez definidos los tres términos de fuerza, solamente resta el flujo de momento. El flujo que entra al volumen de control puede expresarse así:

$$\rho \left[QV - \frac{\partial QV}{\partial x} \cdot \frac{\Delta x}{2} \right] \quad (30)$$

Mientras que el flujo que sale del volumen se expresa como:

$$\rho \left[QV + \frac{\partial QV}{\partial x} \cdot \frac{\Delta x}{2} \right] \quad (31)$$

Por lo tanto, la variación neta de momento (flujo de momento) que entra al volumen de control es:

$$- \rho \cdot \frac{\partial QV}{\partial x} \cdot \Delta x \quad (32)$$

Ya que el impulso del líquido en el volumen de control es $\rho Q \Delta x$, la rapidez de cambio de momento se expresa como:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Q \Delta x) = \rho \frac{\partial Q}{\partial t} \cdot \Delta x \quad (33)$$

Replanteando el principio de conservación del momento:

El régimen neto de momento (flujo de momento) que entra al volumen (Ecuación 32) más la suma de todas las fuerzas externas que actúan sobre el volumen [Ecuación 21 +

Ecuación 23 + Ecuación 28] es igual al régimen de acumulación de momento (Ecuación 33), de aquí:

$$\rho\Delta x \frac{\partial Q}{\partial t} = -\rho \frac{\partial QV}{\partial x} \Delta x - \rho g A \frac{\partial h}{\partial x} \Delta x - \rho g A \frac{\partial Z_0}{\partial x} \Delta x - \rho g A \cdot S_f \Delta x \quad (34)$$

La elevación de la superficie del agua (z) es igual a $z_0 + h$, por lo tanto:

$$\frac{\partial Z}{\partial x} = \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial Z_0}{\partial x} \quad (35)$$

Donde $\partial z/\partial x$ es la pendiente de la superficie del agua. Al sustituir la Ecuación 35 por la Ecuación 34, y dividir para $\rho\Delta x$ y pasar todos los términos a la izquierda se obtiene la forma definitiva de la ecuación de momento:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial QV}{\partial x} + gA \left(\frac{\partial Z}{\partial x} + S_f \right) = 0 \quad (36)$$

II.2.3. Aplicación de las ecuaciones de flujo no permanente con HEC-RAS

La Figura 4 ilustra las características en dos dimensiones de la interacción entre el cauce y las llanuras de inundación. Cuando el río crece el agua se mueve lateralmente lejos del cauce, inundando la llanura de inundación y llenando las áreas de almacenamiento disponibles. A medida que la profundidad aumenta, la llanura de inundación comienza a conducir el agua corriente abajo, generalmente, a lo largo de una ruta más corta que la del cauce principal. Cuando el río está disminuyendo, el agua se mueve hacia el cauce a partir de los márgenes complementando el flujo en el cauce principal.

Debido a que la dirección principal de flujo es orientada a lo largo del cauce, este flujo de dos dimensiones a menudo se puede aproximar con precisión por una representación unidimensional. Las áreas de anegamiento fuera de los cauces se pueden modelar con áreas

de almacenamiento que intercambian agua con el cauce. El flujo en los márgenes o riberas se puede aproximar como el flujo a través de un cauce independiente.

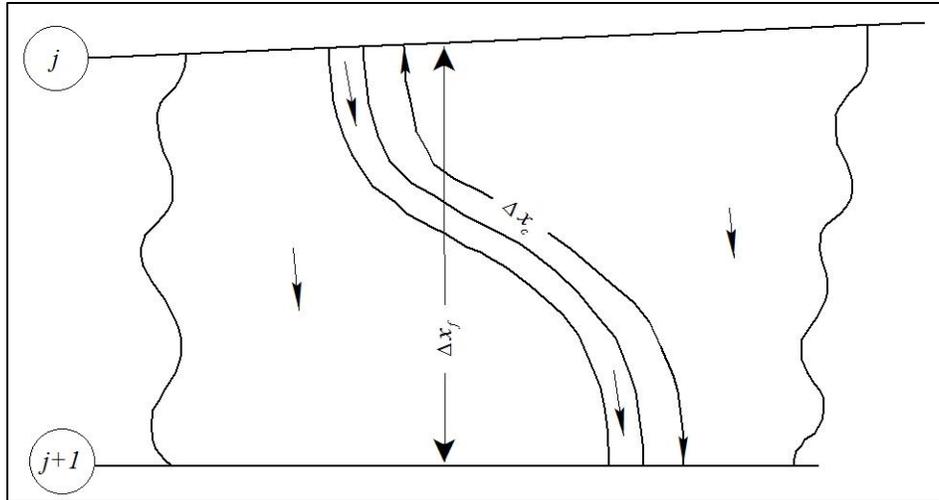


Figura 4. Flujos en el cauce y llanura de inundación.

Este problema entre el cauce y la llanura de inundación se ha tratado de maneras diferentes. Un enfoque común es hacer caso omiso del transporte entero sobre los márgenes del cauce, suponiendo que las riberas sólo se utilizan para el almacenamiento. Este supuesto puede ser adecuada para ríos grandes como el río Mississippi donde el cauce se limita por diques y la llanura aluvial que queda es o bien una densa vegetación o un área de almacenamiento fuera del cauce. Fread (1976) y Smith (1978) trataron este problema dividiendo el sistema en dos cauces independientes y escribiendo ecuaciones de continuidad y momento para cada cauce. Para simplificar el problema ellos supusieron una superficie horizontal del agua en cada sección transversal perpendicular a la dirección de flujo; de tal manera que el intercambio de cantidad de movimiento entre el canal y la llanura de inundación era insignificante y que la descarga era distribuida de acuerdo al transporte, es decir:

$$Q_c = \phi Q \quad (37)$$

Donde Q_c es el flujo en el cauce, Q el flujo total, $\phi = K_c / (K_c + K_f)$, K_c el transporte en el cauce y K_f el transporte en la llanura de inundación.

Con esta hipótesis, las ecuaciones unidimensionales de movimiento se pueden combinar de la siguiente manera:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial \phi Q}{\partial x_c} + \frac{\partial (1-\phi)Q}{\partial x_f} = 0 \quad (38)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_c} \left(\frac{\phi^2 Q^2}{A_c} \right) + \frac{\partial}{\partial x_f} \left(\frac{(1-\phi)^2 Q^2}{A_f} \right) + gA_c \left(\frac{\partial z}{\partial x_c} + S_c \right) + gA_f \left(\frac{\partial z}{\partial x_f} + S_f \right) = 0 \quad (39)$$

$$S_c = \frac{\phi^2 Q^2 n_c^2}{R_c^{4/3} A_c^2}, \quad S_f = \frac{(1-\phi)^2 Q^2 n_f^2}{R_f^{4/3} A_f^2} \quad (40)$$

Donde Q es el flujo total en la parte baja del tramo de la corriente, A (A_c, A_f) el área de la sección transversal del flujo (en el cauce, llanura de inundación), x_c y x_f son las distancias a lo largo del cauce y llanura de inundación, P el perímetro húmedo, R el radio hidráulico (A/P), n el valor de rugosidad de Manning y S la pendiente de fricción. ϕ determina como se divide el flujo entre el canal y la llanura de inundación de acuerdo al transporte K_c y K_f .

Estas ecuaciones fueron aproximadas usando diferencias finitas implícitas y resueltas numéricamente usando la técnica iterativa de Newton – Raphson.

Ampliando el trabajo desarrollado por Fread y Smith, Barkau (1982) manipuló las ecuaciones en diferencias finitas para el cauce y la llanura de inundación, definiendo un nuevo conjunto de ecuaciones que son computacionalmente más convenientes. Usando un factor de distribución de la velocidad, Barkau combino los términos de convección. Además, mediante la definición de una trayectoria de flujo equivalente, sustituyó los términos de pendiente de fricción con una fuerza equivalente.

Las ecuaciones derivadas por Barkau son la base para la solución de flujo no permanente en el software HEC-RAS.

II.3. Modelos digitales de elevación

De acuerdo a Martínez (1999), tradicionalmente, la información topográfica relacionada con el estudio de los procesos hidrológicos se hacía a partir de mapas topográficos y a través de la fotointerpretación de fotografías aéreas.

En los mapas, la información sobre variables continuas, como la altura, se representa en forma de isolíneas (o curvas de nivel en el caso de la altura). El análisis de esta información se hacía habitualmente de forma visual, observando la forma y la distancia entre curvas de nivel, y a partir de esto se reconocían formas del terreno, o bien mediante la medición de distancias y diferencias de alturas o valores de isolíneas se calculaban pendientes o gradientes.

En el caso de las fotografías aéreas, la obtención de información es habitualmente de tipo cualitativo. Un ejemplo es el caso de la fotointerpretación dirigida al análisis de formas del terreno o para cartografía de suelos.

La obtención de información cuantitativa está limitada, sin embargo, por el hecho de que las fotografías aéreas contienen distorsiones debidas al relieve, por el hecho de ser una proyección cónica y no ortogonal y por los efectos de exageración vertical. Esto hace que se tenga que recurrir a técnicas fotogramétricas para la extracción de información cuantitativa, que en muchos de los casos están limitadas por cuestiones de tipo económico.

La aparición y extensión de los SIG ha hecho posible y necesario la aplicación de un concepto, concebido ya a finales de la década de los 1950 para modelizar, analizar y visualizar los fenómenos relacionados con la topografía, o con variables de distribución continua, de una forma numérica y procesable por ordenadores: los Modelos Digitales de Terreno (MDT), los cuales pueden definirse como una representación estadística del terreno, en forma de números digitales, por medio de un conjunto de puntos con coordenadas X, Y, Z respecto a un sistema de georreferenciación conocido (Miller y Laflamme, 1958).

La obtención de variables del terreno de forma automática a partir de los MDT y los SIG ha hecho que sus aplicaciones sean muy diversas y una de ellas sea su uso en la simulación de inundaciones.

II.3.1. Datos topográficos para la construcción de MDT

El primer paso dentro del proceso de generación de un MDT es la obtención de la información, es decir: la captura de la realidad. La precisión requerida para un modelo del terreno y de los elementos (objetos) que se encuentran sobre él define la técnica a utilizar.

Altímetros radar y laser

La información topográfica se obtiene de forma indirecta (no mide directamente las distancias) mediante la captura de energía que emite el propio sistema.

El radar se basa en el efecto *Doppler*, obteniendo la distancia del sensor a un punto midiendo el tiempo y el azimut (función del cambio de frecuencia del efecto *Doppler*, el ángulo de incidencia y la velocidad de la plataforma). La energía captada es la suma coherente de reflectancias que llegan al sensor en un instante dado (Ibañez, 2008).

El sistema Láser, esencialmente, consiste en un sensor láser instalado en una plataforma móvil que barre las superficies que se encuentran entre el sensor y el terreno desnudo, obteniendo una nube de puntos de coordenadas precisas. El equipo está compuesto por un sensor láser, un sistema de navegación inercial (INS) y un receptor GPS en una plataforma móvil. Para obtener la máxima precisión se dispone en tierra una red GPS para trabajar de forma conjunta con el receptor GPS de la plataforma.

GPS (*Global Positioning System*)

Normalmente, este tipo de métodos se emplean en casos particulares en que se requiere una alta precisión, en superficies pequeñas, o para complementar otros métodos de adquisición como los fotogramétricos.

Este método utiliza un conjunto o constelación de satélites de referencia y, mediante métodos de triangulación, permiten obtener valores de las tres coordenadas espaciales para un lugar concreto de la superficie terrestre. El proceso de trabajo del GPS es simple pero exige determinar la distancia a un mínimo de tres satélites simultáneamente con gran precisión. La opción utilizada es que los satélites emiten pulsos de radiofrecuencia en ciertos momentos y un receptor calcule la distancia en función del momento de recepción (Coppola, 2009).

Restitución fotogramétrica

Este método se basa en el análisis estereoscópico de fotografías aéreas o pares estereoscópicos de imágenes de satélite (por ejemplo el satélite SPOT, que tiene capacidad para adquirir imágenes con solape), mediante instrumentos fotogramétricos o programas de ordenador capaces de realizar estereocorrelaciones a partir de fotografías digitalizadas (Martínez, 1999).

A partir del análisis estereoscópico de imágenes, y en base a las diferencias de paralaje, se puede llegar a determinar la altura relativa de puntos de muestreo. Estas alturas se pueden convertir en altitudes si se georreferencia de forma absoluta la base del modelo estereoscópico mediante puntos de control de coordenadas X, Y, Z exactas conocidas.

Actualmente existen sistemas “restituidores fotogramétricos” automatizados que realicen esta labor grabando directamente los resultados en un formato digital compatible con sistemas de información geográfica. El acceso al terreno es necesario para establecer un conjunto de puntos de apoyo que permiten fijar valores de altitud en una escala absoluta (Coppola, 2009).

Cartografía existente

De acuerdo a Martínez (1999), la obtención de información topográfica a partir de cartografía existente es el método más habitual de obtener los datos requeridos para la construcción de MDT, ya que los mapas topográficos son fáciles de adquirir y contienen la información necesaria: puntos con cota conocida a lo largo de las curvas de nivel, cotas en

las cimas y líneas significativas como la red de drenaje, sin embargo, la precisión que se podrá alcanzar en los MDT generados por estos procedimientos es limitada, y depende en gran medida de la calidad de los datos originales del mapa utilizado, así como también del método de interpolación aplicado.

Levantamiento topográfico

Un levantamiento topográfico consiste en representar los elementos singulares del terreno en un plano. Todos los elementos del terreno quedan definidos por una serie de puntos y cada uno de estos puntos representados en un proyecto definen una nube de puntos, que a la vez definen una curva de nivel, que no es otra cosa que la representación de las diferentes secciones del terreno a un intervalo de altura. La medida de los puntos es totalmente manual, realizada de técnicos especializados mediante una específica instrumentación (Coppola, 2009).

Los levantamientos topográficos requieren una gran cantidad de trabajo de campo. En una gran área, requieren además la materialización de una red base. Todos estos trabajos junto con la baja productividad disparan los costes y los descartan para un levantamiento en una gran área (Martínez, 1999).

II.3.2. Información topográfica disponible en México

En México, la principal fuente de información topográfica es el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), el cual cuenta con cartografía digital en escalas 1:250,000, 1:50,000, 1:20,000 y recientemente 1:10,000, siendo estas tres últimas las más utilizadas.

Cartografía 1:50,000

La información 1:50,000 se encuentra representada por cartas impresas y digitales así como por el Continuo de Elevaciones Mexicano 2.0 (CEM 2.0), el cual representa las altitudes del territorio mexicano mediante valores que indican puntos sobre la superficie del terreno, cuya ubicación geográfica se encuentra definida por coordenadas (X,Y) a las cuales

se integran las elevaciones (Z), es decir, es un MDE. Los puntos se encuentran espaciados y distribuidos de modo regular a cada segundo de arco de coordenada geográfica.

La información proveniente del CEM 2.0 es producto principalmente de la interpolación de la cartografía topográfica escala 1:50,000 con el apoyo de los continuos nacionales de cuerpos de agua, red hidrográfica, bancos de nivel y vértices geodésicos, todos ellos también en escala 1:50,000 (INEGI, 2012).

Las curvas de nivel 1:50,000 originales fueron obtenidas mediante técnicas fotogramétricas a partir de fotografías aéreas, información geodésica y verificación de campo.

El CEM, como su nombre lo indica, es un continuo que cubre toda la superficie del territorio nacional por lo cual es posible obtener esta información de cualquier parte de la República Mexicana (Figura 5) y cuenta con una resolución de 30 metros.

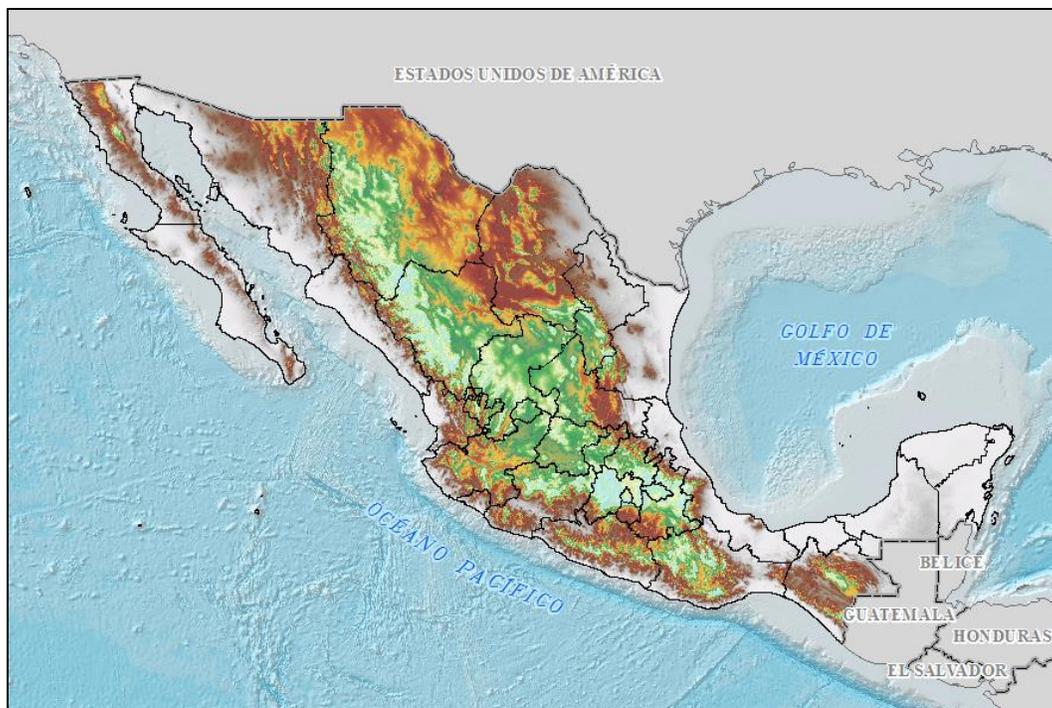


Figura 5. Continuo de Elevaciones Mexicano.

Actualmente, el CEM 2.0 ya no se encuentra disponible para su descarga debido a que este fue actualizado a la versión 3.0.

Cartografía 1:20,000

En México, la información topográfica escala 1:20,000 se encuentra disponible en cartografía impresa y digital y recientemente (2013) también es posible disponer de un Continuo de Elevaciones Mexicano.

Las curvas de nivel 1:20,000 fueron obtenidas de la misma forma que las curvas 1:50,000 siendo la única diferencia la escala de interpretación. Su disponibilidad está limitada a 1997 cartas, ubicadas principalmente en los estados de Nuevo León, Veracruz y Tamaulipas (Figura 6).

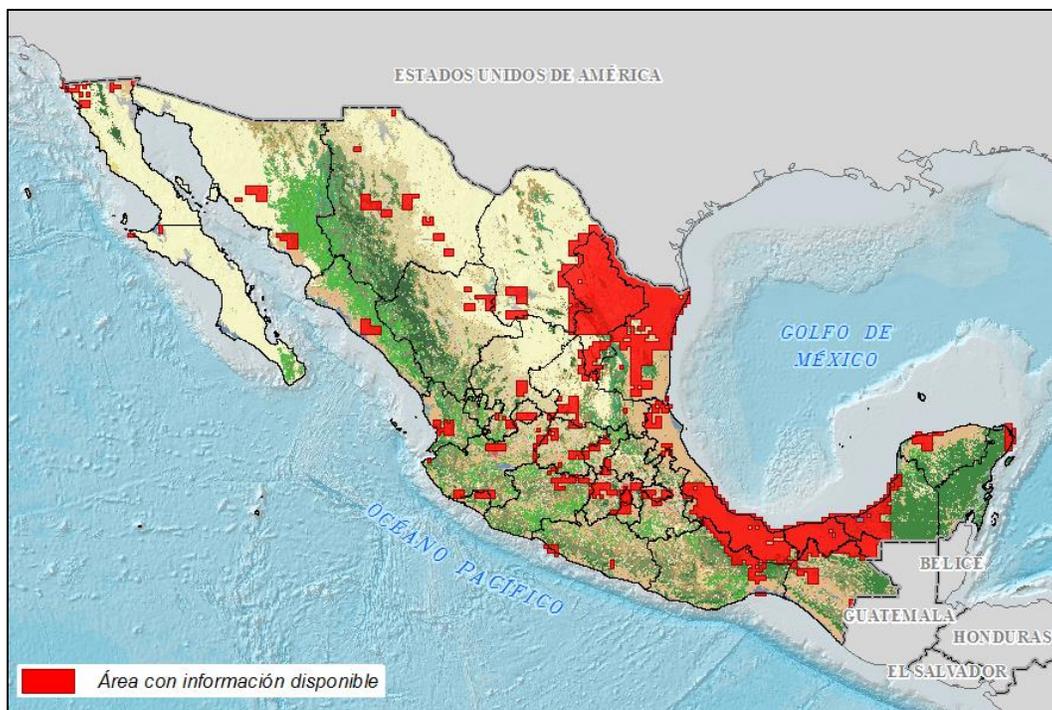


Figura 6. Disponibilidad de la información topográfica 1:20,000 en la República Mexicana.

El acceso a la información topográfica 1:20,000 en la versión de cartas digitales (formatos pdf, tif, gif y shp) es a través de la página de internet del INEGI en el área “Consulta” correspondiente a la sección “Productos y Servicios”, siendo el tema a consultar

el de Topografía (Figura 7). Para poder descargar la información de interés es necesario que se tenga una cuenta de usuario.

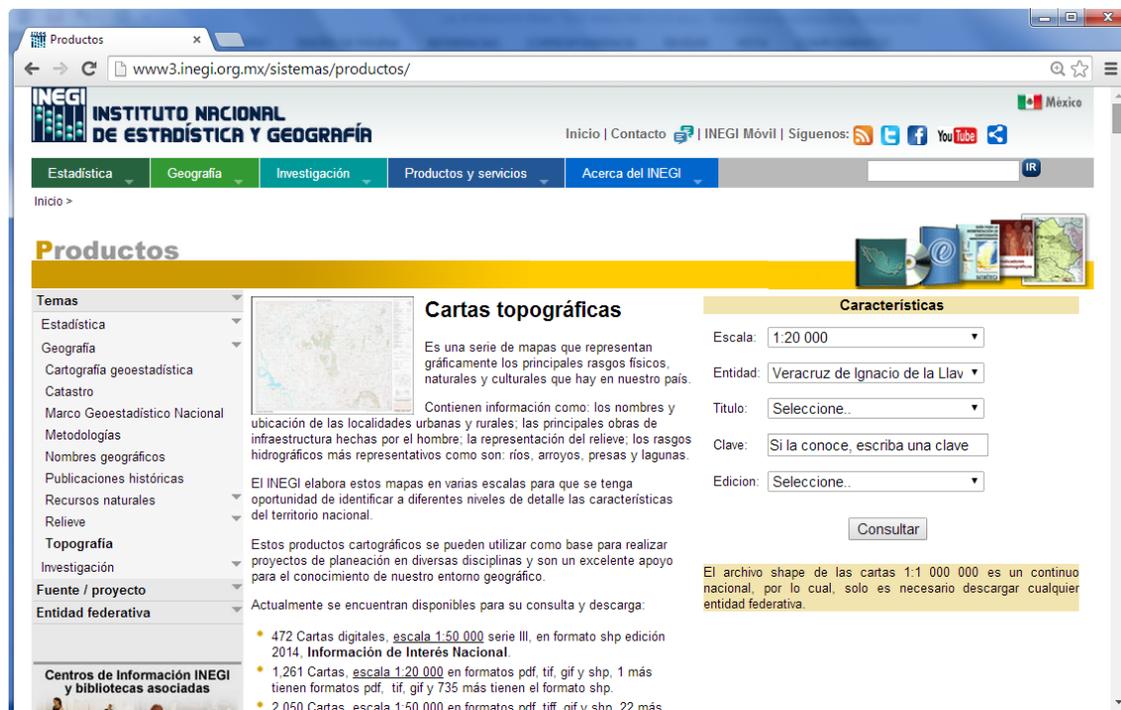


Figura 7. Página de descarga de las cartas topográficas 1:20,000.

El Continuo de Elevaciones Mexicano escala 1:20,000 corresponde a la versión 3.0 (CEM 3.0) cuya característica principal es la resolución de 15 metros (las versiones anteriores tienen una resolución de 30 metros). Esta característica deriva en un producto con mayor detalle y por consiguiente más confiable para apoyar diversas tareas (INEGI, 2014).

Al igual que el CEM 2.0, el CEM en su versión 3.0 se encuentra disponible para todo el territorio nacional, pero además, presenta la opción de descargarlo a diferentes resoluciones (15, 30, 60, 90 y 120 metros) y extensiones (entidad federativa o nacional), siendo el sitio de descarga la página de internet del INEGI que se muestra en la Figura 8. A diferencia de la descarga de las cartas topográficas 1:20,000 no es necesario tener una cuenta de usuario para poder realizar la descarga del CEM 3.0.

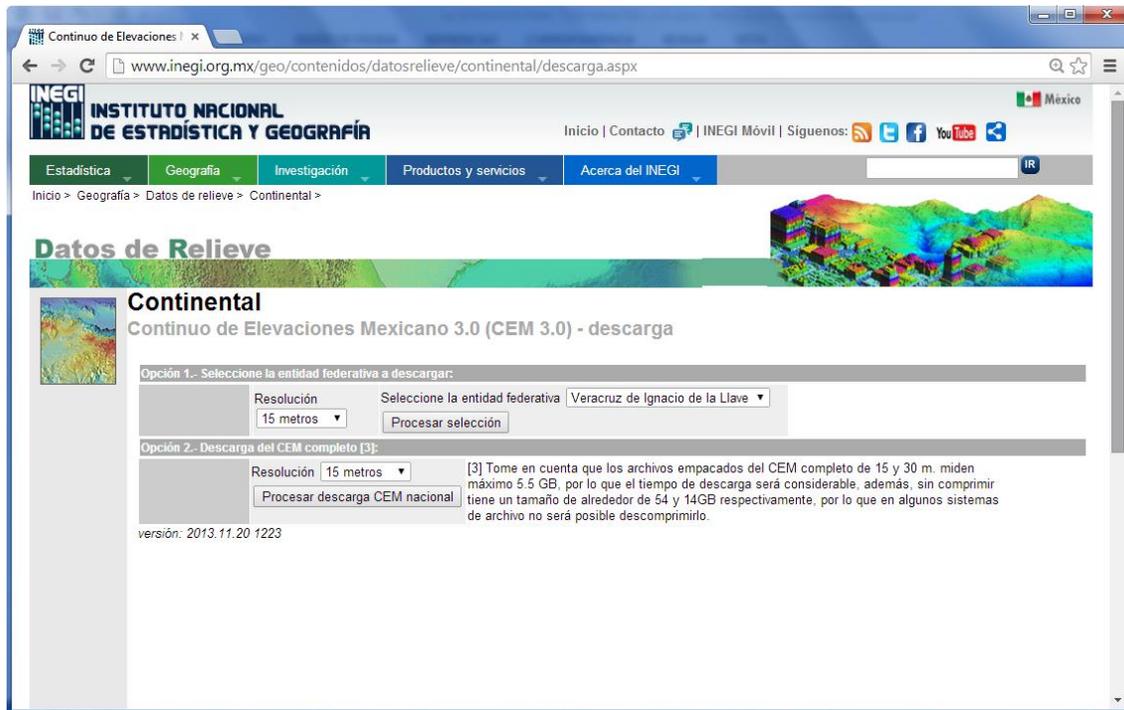


Figura 8. Página de descarga del CEM 3.0.

Cartografía 1:10,000

La información 1:10,000 corresponde a la cartografía LIDAR, la cual es derivada de datos del Sistema Láser Aerotransportado LIDAR y corresponde a una matriz de datos de elevación interpolados a 5 m de resolución a partir de las coordenadas de todos los puntos colectados de los pulsos de luz láser emitidos, por ello, se registran las elevaciones de rasgos de la superficie del terreno, así como naturales y de origen antrópico.

Debido a que la cartografía LIDAR es reciente, en la República Mexicana solo se cuenta con esta información de forma completa en los estados de Nuevo León, Tabasco, Colima y D.F., así como parcialmente en los estados de Veracruz, Tamaulipas, Guanajuato y Aguascalientes, mientras que en el resto de los estados, la disponibilidad de cartografía LIDAR es mínima (Figura 9).

La cartografía LIDAR se obtiene de la página de internet del INEGI en el área “Consulta” correspondiente a la sección “Productos y Servicios” siendo el tema a consultar el de Relieve (Figura 10). Las opciones de descarga de cartografía LIDAR que ofrece la

página del INEGI son referentes al tipo de cartografía LIDAR (superficie o terreno) y al tipo de archivo (GRID o ASCII). Para poder descargar la información de interés es necesario que se tenga una cuenta de usuario.



Figura 9. Disponibilidad de cartografía LIDAR en la República Mexicana.

Figura 10. Página de descarga de la cartografía LIDAR.

III. METODOLOGÍA

III.1. La cuenca del río La Antigua

La cuenca del río La Antigua se ubica al centro del Estado de Veracruz de Llave y el sureste del Estado de Puebla, con una superficie de aproximadamente 2,115 km², sus coordenadas extremas son; 2,165,794 norte, 2,119,885 sur, 681,371 oeste y 777,783 este. La cuenca se encuentra principalmente entre los municipios de Puente Nacional, Tlaltetela, Coatepec, Xico, Ayahualulco, Ixhuacán de los Reyes y Cosautlán de Carvajal en el Estado de Veracruz de Llave y en los municipios de Quimixtlán, Chilchotla y Chichiquila del Estado de Puebla (Figura 11).

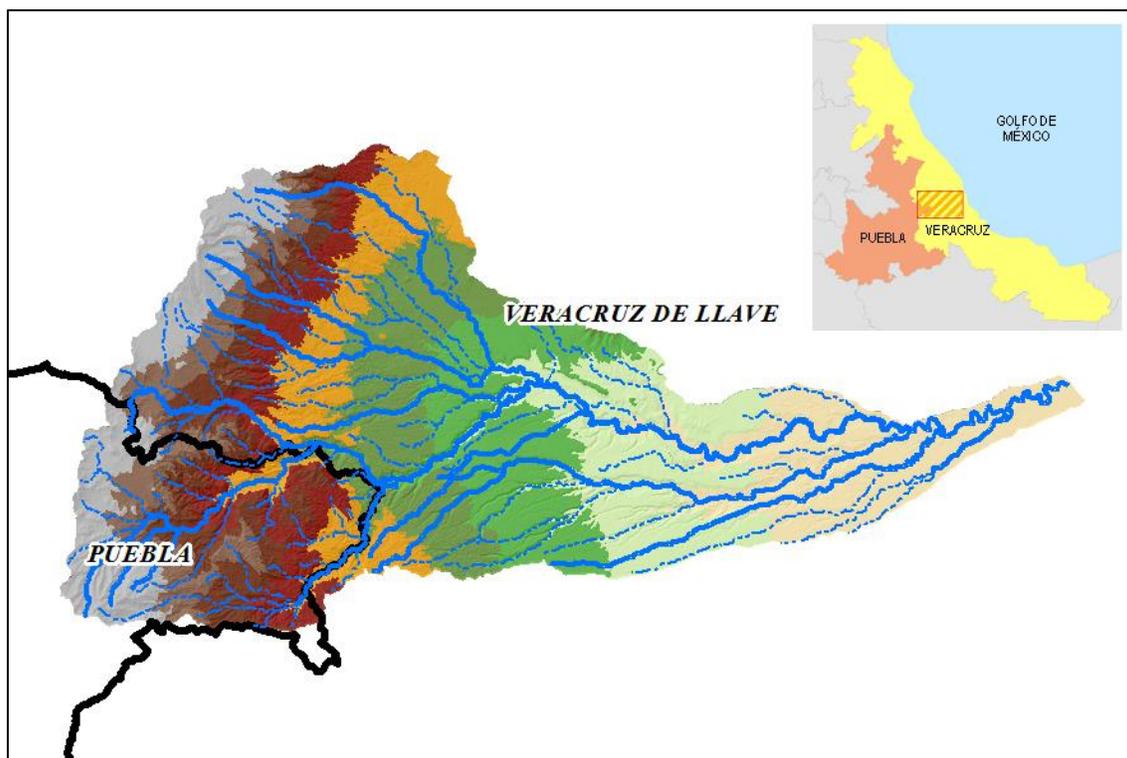


Figura 11. Ubicación de la cuenca del río La Antigua.

La cuenca del río La Antigua se conforma de elevaciones que van desde los 5 m hasta 4,200 m siendo el Pico de Orizaba el elemento orográfico de mayor elevación. De manera general, en la cuenca predominan las áreas fuertemente inclinadas, sin embargo,

también existen grandes áreas con pendientes bajas, principalmente al este de la cuenca. La pendiente media de la cuenca es de 27%.

De acuerdo a la variabilidad altitudinal dentro de la cuenca, es posible encontrar una gran diversidad de climas que van desde los cálidos que se encuentran ubicados en las partes más bajas de la cuenca, pasando por los climas semicálidos, hasta llegar a los climas de tipo templado y semifrío en las áreas de mayor altitud dentro de la cuenca. La precipitación media anual en la zona es de 1,400 mm.

Con respecto a los tipos de suelo, en la cuenca existen siete suelos con sus distintas unidades los cuales se encuentran asociados en diversas formas y de los cuales los predominantes son; andosol, vertisol, litosol y el feozem.

En la cuenca, el uso de suelo y vegetación que predomina es el de la agricultura con el 51% el cual se encuentra representado principalmente por cultivos de temporal y en una mínima superficie por cultivos de humedad y riego. Otro uso de suelo con una importante superficie dentro de la cuenca es el de pastizal cultivado el cual representa el 17% de la superficie.

De los tipos de vegetación presentes dentro de la cuenca se encuentran los bosques con el 23% de las superficies y las selvas con 6%. Los bosques se encuentran representados por el bosque mesófilo de montaña, bosque de pino – encino y bosque de pino. Las selvas corresponden a la selva baja caducifolia y la selva mediana subcaducifolia.

Hidrológicamente, la cuenca está drenada por una gran cantidad de ríos y arroyos, siendo el principal el río La Antigua del cual se desprende el nombre de la cuenca.

El río La Antigua tiene sus orígenes a cuatro kilómetros al este de la localidad de González Ortega en el Estado de Puebla en donde es conocido como río del Resumidero para más adelante ser nombrado río Pescados y finalmente río La Antigua. El río La Antigua cuenta con una longitud de 147 km y desemboca en el Golfo de México. El río presenta una

pendiente media del 1.6% y en general el lecho del río es grava arenoso con boleos y en sus márgenes es común encontrar vegetación de tipo herbácea y en menor medida arbustos y árboles. El cauce durante algunas partes de su trayecto presenta grandes taludes de tierra en alguno de sus márgenes.

En septiembre del 2010, el huracán Karl provocó uno de los mayores eventos de inundación en la cuenca, siendo el río La Antigua uno de los principales ríos que se desbordaron, inundando sus alrededores y afectando localidades como José Cardel y Nicolás Bravo. Otros ríos que presentaron desbordamientos y con ellos afectaciones importantes, fueron el Santa María y La Bomba, debido a lo cual, el área de estudio, además de incluir al río La Antigua en el tramo que va desde la localidad de Los Baños, municipio de Tlaltetla, hasta la localidad de Nicolás Bravo en el municipio de La Antigua, también considera los ríos Santa María y La Bomba (Figura 12).

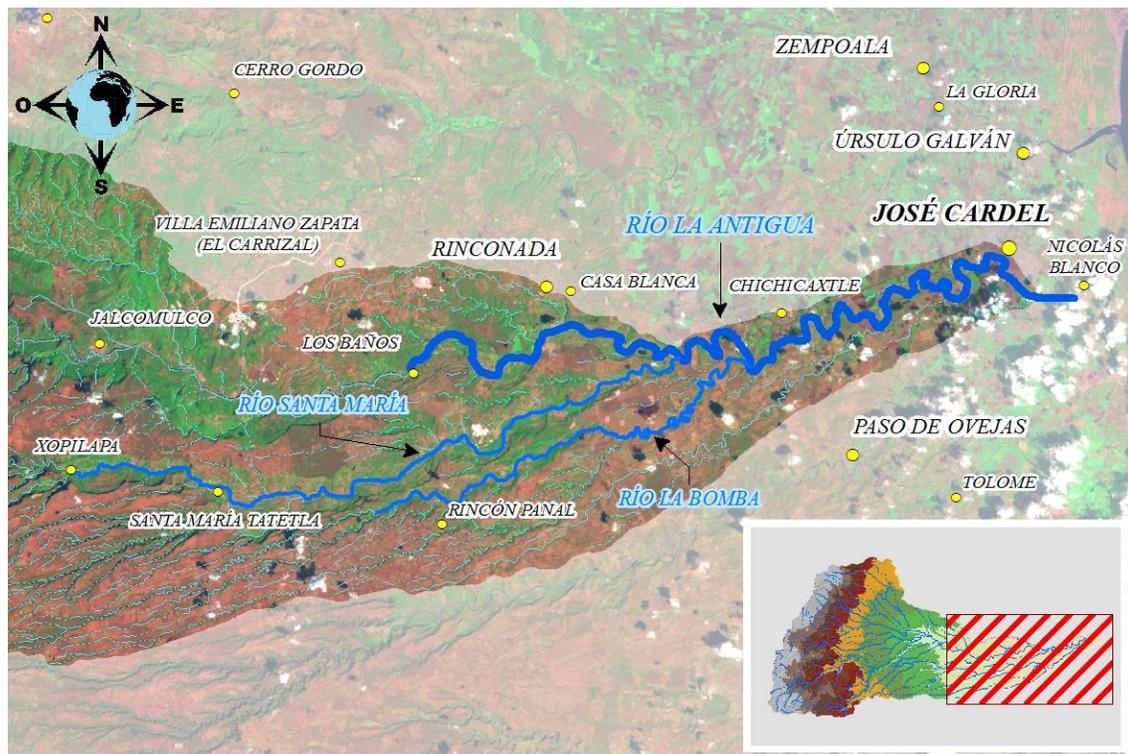


Figura 12. Ubicación de los ríos La Antigua, Santa María y La Bomba dentro de la cuenca del río La Antigua.

III.2. Fuentes de información empleadas

La procedencia de la información para la obtención de las áreas de inundación fue la siguiente:

- Modelo digital de elevación: Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0), CEM 2.0, curvas de nivel 1:20,000 y cartografía LIDAR, todos ellos del INEGI.
- Precipitación: Estaciones meteorológicas del Servicio Meteorológico Nacional obtenidas del Extractor Rápido de Información Climatológica (ERIC III v. 3.2).
- Gastos máximos y lecturas de nivel del agua: Estaciones hidrométricas de la Comisión Nacional del Agua, disponibles en el Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS).
- Uso de suelo y vegetación: Imágenes de satélite RapidEye y Spot.
- Edafología: Mapa 1:250,000 de suelos elaborado por INIFAP y CONABIO.

Las herramientas empleadas para la preparación de la información requerida para la simulación hidrológica fueron: ArcMap con las extensiones *Spatial Analyst* y HEC-GeoRAS así como el HEC-HMS para la generación de los hidrogramas, para la simulación del tránsito de avenidas se utilizó HEC-RAS.

III.3. Obtención de hidrogramas para la simulación en HEC-RAS

La obtención de los hidrogramas requeridos para la simulación en HEC-RAS comprendió cinco etapas básicas las cuales fueron: creación del modelo de cuenca, creación del modelo meteorológico, definición de especificaciones de control, simulación y calibración.

III.3.1. Creación del modelo de cuenca

En este componente mediante la utilización de la extensión HEC-GeoHMS en la plataforma de ArcMap se definieron los elementos hidrológicos del sistema; subcuencas, tramos de corriente, uniones de corrientes y punto de entrega (Figura 13).

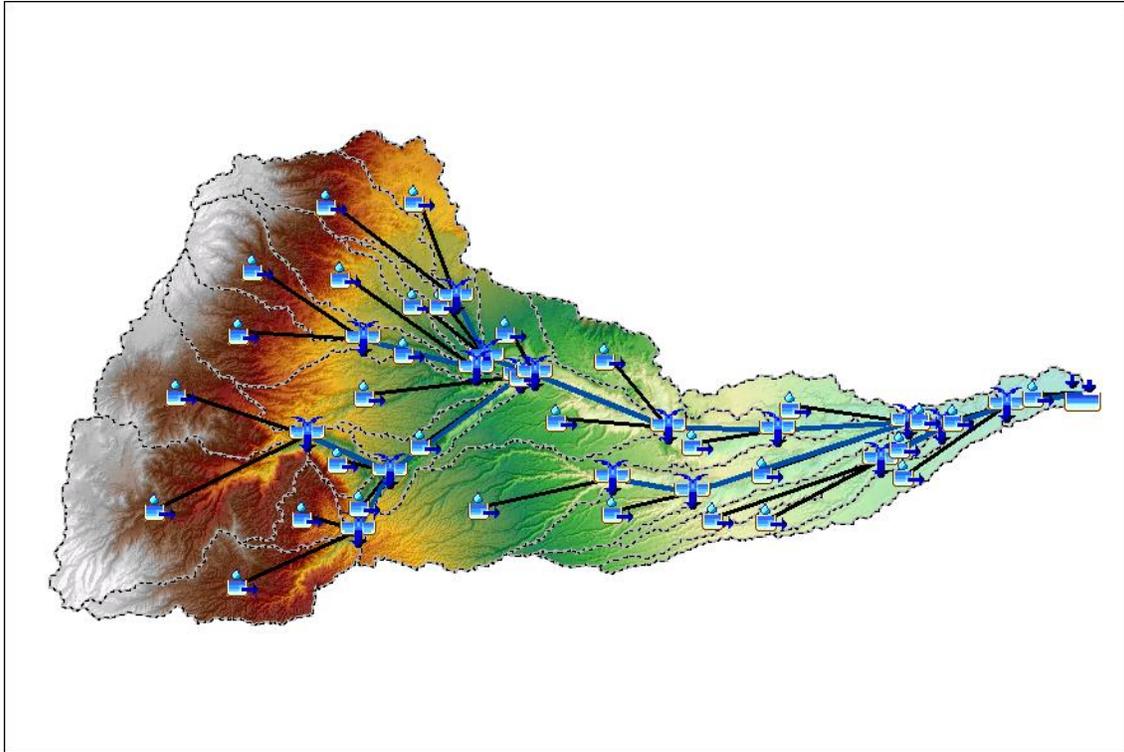


Figura 13. Geometría del sistema de subcuencas.

Definidos los elementos de la red hídrica, se ingresó la información de cada subcuenca, específicamente se definió en orden de ejecución el método de estimación de pérdidas, el método de transformación lluvia-caudal y el método de determinación del flujo base. Luego se procedió al ingreso de los parámetros que correspondían a los tramos de corrientes en función del método seleccionado.

III.3.2. Creación del modelo meteorológico

Al igual que la creación del modelo de cuenca, el modelo meteorológico fue creado en la plataforma de ArcMap con la extensión HEC-GeoHMS. El método seleccionado fue el de “Pesos” para lo cual fue necesario la obtención de las áreas de influencia dentro de la cuenca de las estaciones climatológicas, esto se hizo mediante la creación de polígonos de Thiessen (Figura 14), posteriormente considerando la superficie de cada polígono de Thiessen dentro de cada una de las subcuencas se calcularon los pesos para cada estación climatológica.

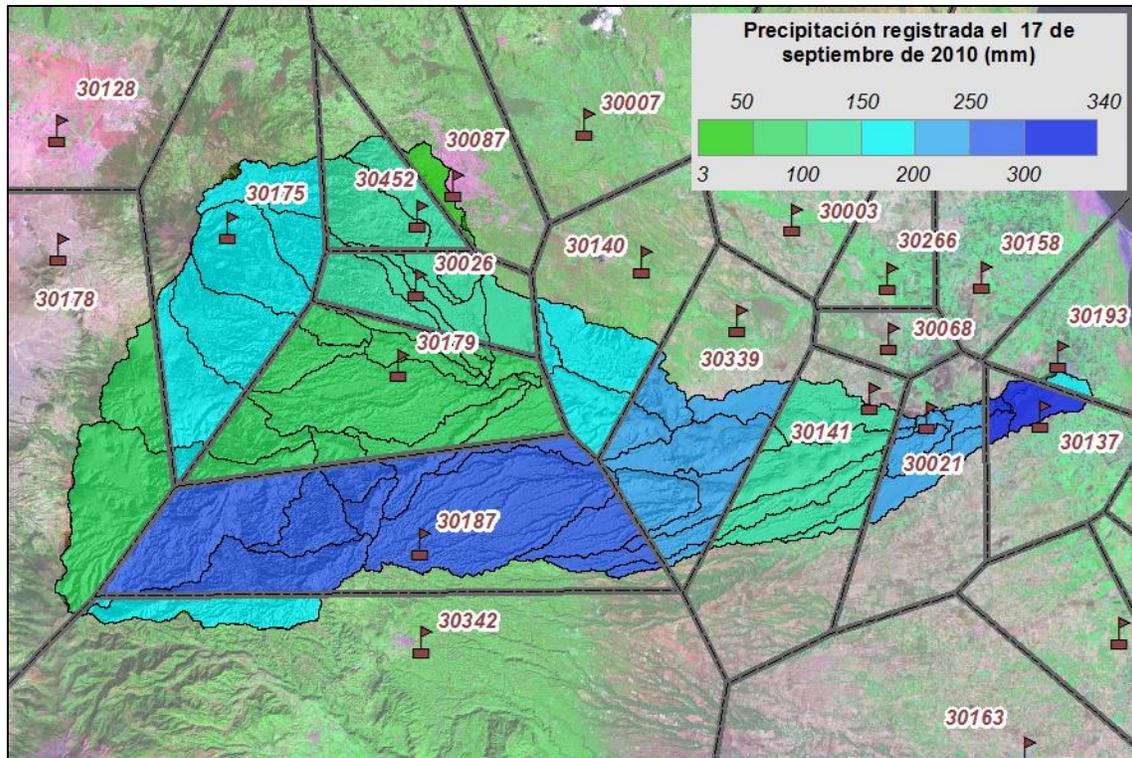


Figura 14. Polígonos de Thiessen de las estaciones climatológicas con información disponible.

III.3.3. Definición de especificaciones de control

Las especificaciones de control se efectuaron en la plataforma del HEC-HMS y la cual consistió en definir los periodos a simular, los tiempos de lluvia e intervalos. Una vez definido el modelo de la cuenca y seleccionado un modelo meteorológico se pudo realizar la modelación hidrológica para diferentes intervalos de tiempo o con diferentes incrementos.

III.3.4. Simulación

Para realizar la simulación con el modelo HEC-HMS se seleccionaron los componentes anteriores, el modelo de cuenca, el modelo meteorológico y las especificaciones de control deseadas, luego se procedió a ejecutar el programa, a realizar cálculos y a generar resultados.

III.3.5. Calibración

Debido a que al confeccionar el modelo, todos los datos introducidos (excepto, probablemente, la superficie de la cuenca) están afectados de grandes errores o son meras suposiciones, el modelo fue calibrado automáticamente con los hidrogramas obtenidos de la estación hidrométrica Cardel.

La calibración automática consistió en modificaciones de los parámetros, es decir, una optimización considerando los valores de *CN* y *Lag* principalmente.

III.4. Obtención de mapas de inundación

La obtención de los mapas de inundación se realizó de manera conjunta entre el software HEC-RAS y el ArcMap (extensión HEC-GeoRAS) y consistió de cuatro etapas las cuales se muestran en la Figura 15 y se describen a continuación.

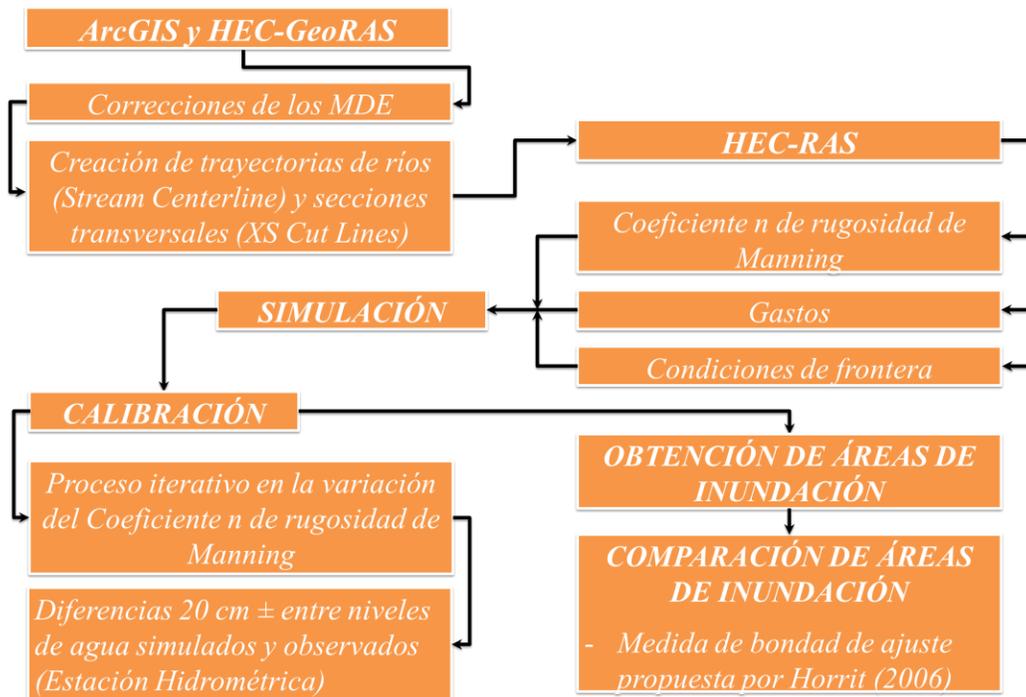


Figura 15. Esquema metodológico para la obtención de las áreas de inundación.

III.4.1. Creación de trayectorias de ríos (*Stream Centerline*) y secciones transversales (*XS Cut Lines*)

Uno de los principales problemas al usar MDE es la calidad de los datos, sobre todo en zonas planas, debido a que pequeñas variaciones en la elevación del terreno pueden generar cambios significativos en el análisis hidrológico.

Una depresión o foso se define como aquella celda cuyos vecinos tienen una elevación mayor a la propia (como se muestra en la Figura 16) por lo tanto, las depresiones tienen vecinos que apuntan en dirección a ellas, mientras que un pico es el caso contrario, es decir, vecinos con elevaciones menores o iguales a los de ellas (Figura 16). En caso de pasar por alto esta situación, es posible que la red de drenaje generada sea defectuosa (CENAPRED, 2011), como se muestra en la Figura 17.

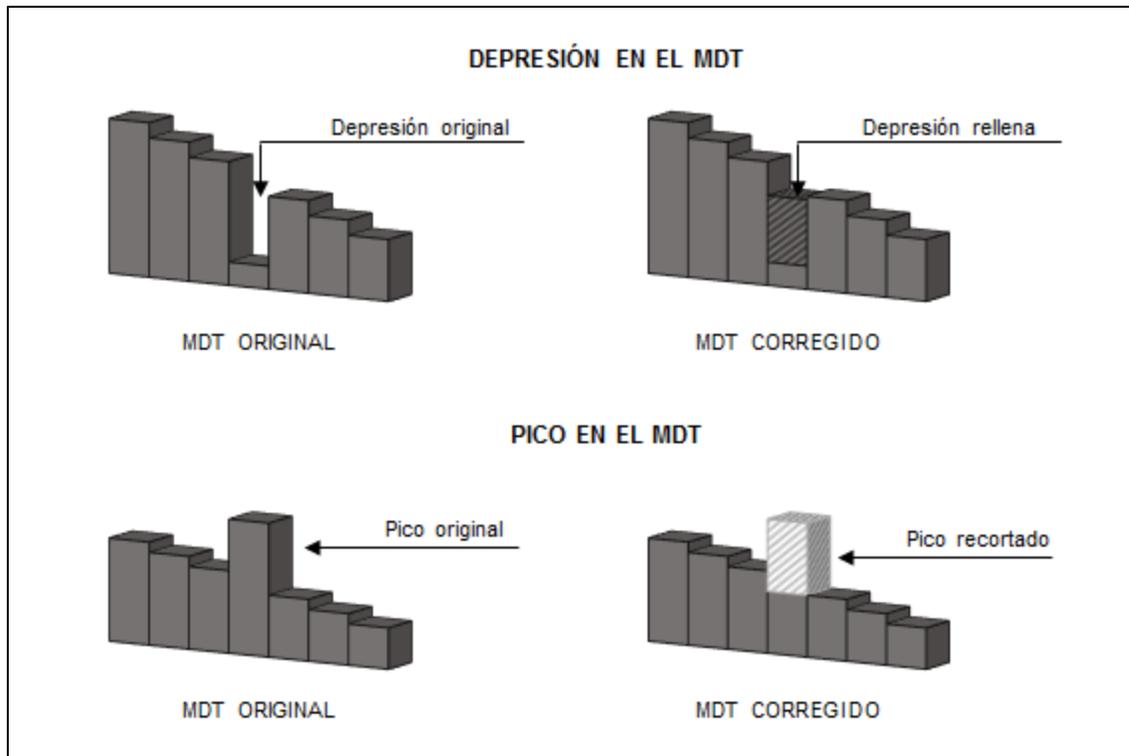


Figura 16. Zonas planas y depresiones en modelos digitales de elevación.

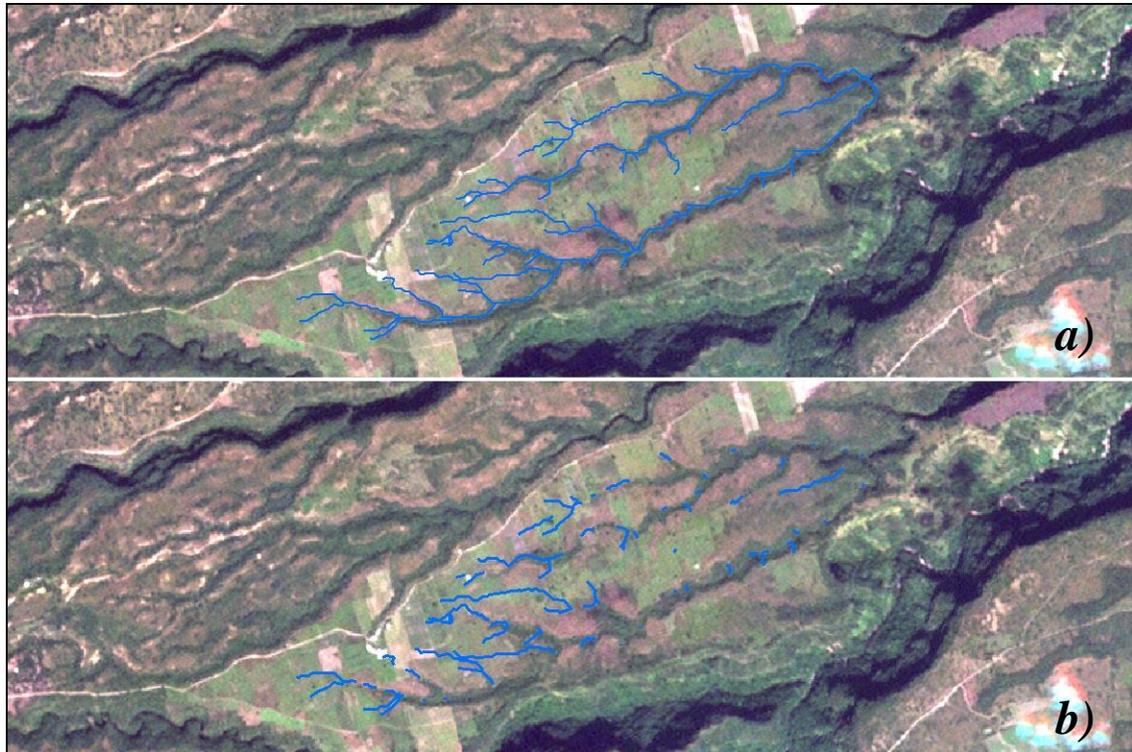


Figura 17. Red de drenaje obtenida a partir de un MDE, a) sin problemas de depresiones y picos y b) con problemas de depresiones y picos.

Debido a lo anterior, como primer paso para la creación de las trayectorias de los ríos fue la corrección de los MDE (Figura 18) por depresiones y/o picos mediante la herramienta *Fill Sinks* en ArcMap.

Con los MDE corregidos, se obtuvieron de manera automatizada las direcciones y acumulación de flujo. Finalmente con base a un umbral definido que le indica al programa cuántas celdas se requiere acumular para aceptar que se forme una corriente se obtuvieron las redes de drenaje para cada uno de los MDE.

De la red de drenaje obtenida, se seleccionaron los cauces que serían simulados y mediante la herramienta *Smooth Line* fueron suavizados para posteriormente ser convertidos a formato de HEC-GeoRAS (archivo de geodatabase) y a cada uno de ellos se les dio una identificación lo cual constituyó el archivo denominado *Stream Centerline*.

Además de la creación de los *Stream Centerline*, fue necesario crear los márgenes de cada uno de ellos, para lo cual se utilizó la opción *Bank Lines* y se procedió a digitalizar los márgenes de los cauces con apoyo de la topografía e imágenes de satélite.

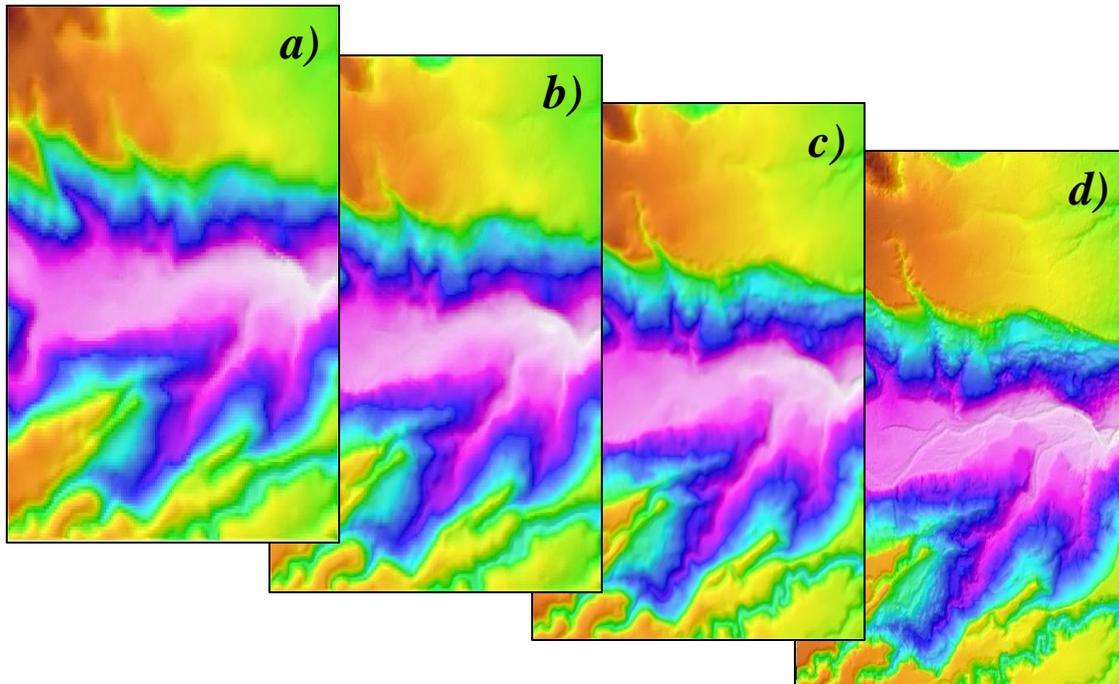


Figura 18. Modelos digitales de elevación obtenidos de a) CEM 2.0 escala 1:50,000, b) CEM 3.0 escala 1:20,000, c) Curvas de nivel escala 1:20,000 y d) Cartografía LIDAR escala 1:10,000.

Con la red de drenaje y los márgenes definidos, se dibujaron secciones transversales sobre los ríos a simular mediante la opción *Create XS Cut Lines* de HEC-GeoRAS, poniendo especial atención en que estas tuvieran un buen arreglo geométrico, es decir, que las secciones cortaran la red hidrográfica en un solo punto y que no se cruzaran entre ellas misma (Figura 19), también se buscó que la separación fuera consistente con la uniformidad de la geometría del río y que las zonas con ciertas singularidades como estrechamientos y cambios bruscos de pendientes fueran debidamente representados.

A la información correspondiente a *Stream Centerline*, *Bank Lines* y *XS Cut Lines* se les creó su topología consistente en la identificación de secciones con respecto a los ríos, elevaciones, longitudes y estaciones, para finalmente ser exportados a formato de HEC-RAS.

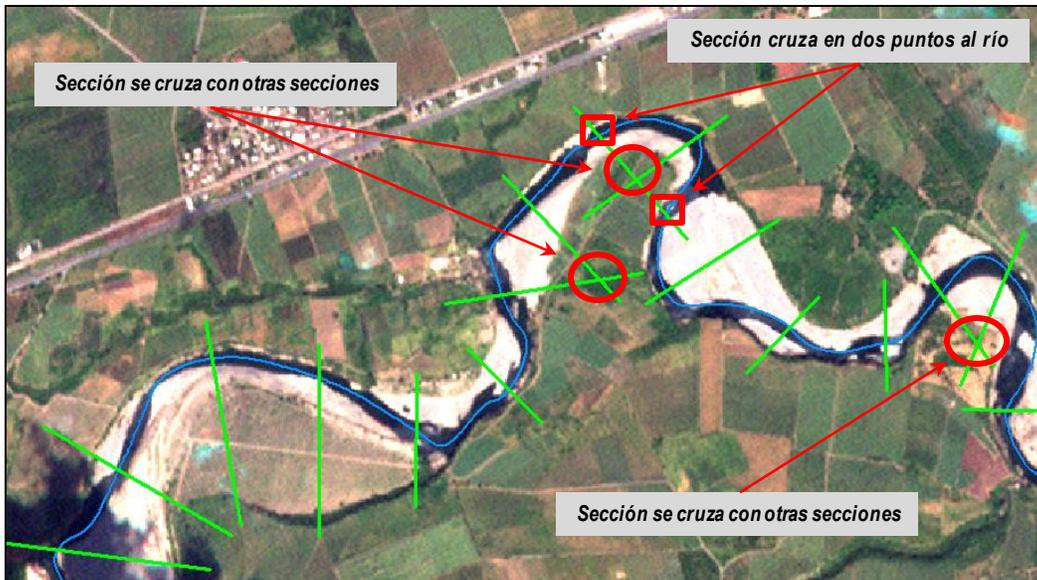


Figura 19. Errores en la geometría de las secciones.

La red de drenaje obtenida con cada uno de los MDE fue comparada entre ellas mismas con respecto a sus longitudes, trayectorias y elevaciones obtenidas.

III.4.2. Preparación de la información y simulación en HEC-RAS

La red hidrográfica importada en HEC-RAS referente a los *Stream Centerline* se le definieron nodos (*Junction*) en donde se unían dos o más cauces, introduciendo un nombre de identificación que tipificaba la zona o cauces representados en el esquema.

La información de *XS Cut Lines* se le adicionó lo correspondiente a los valores de n de "Manning" para la parte del canal y los márgenes para cada una de las secciones obtenidas, mientras que para los *Stream Centerline* se introdujeron las condiciones de frontera en todos los límites externos del sistema, correspondientes a los hidrogramas generados en HEC-HMS.

Debido a que normalmente una simulación en flujo no permanente requiere de una mayor cantidad de secciones con respecto al número de secciones generadas para una simulación en flujo permanente, se crearon nuevas secciones a menor equidistancia que las generadas en ArcMap, esto se hizo de manera automatizada utilizando la opción de *XS*

Interpolation, siendo estas secciones posteriormente comparadas en cuanto a las diferencias que presentaban con respecto a si estas se hubieran obtenido originalmente del MDE en ArcMap, obteniendo de esta manera un indicador de que tan validas son las interpolaciones realizadas en HEC-RAS para mejorar la calidad de los resultados para simulaciones en flujo no permanente.

Además de la comparación de las secciones con respecto a las obtenidas con la interpolación en HEC-RAS, se realizaron comparaciones de las secciones obtenidas con los cuatro MDE en diferentes puntos de los ríos simulados, sitios de comparación que se definieron considerando la pendiente y el ancho de las secciones.

Una vez que toda la geometría y los datos de flujo estuvieron completos se realizaron los cálculos de simulación definiendo el Plan de simulación consistente en la selección de la geometría y datos de flujo a utilizar, así como definición de los tiempos de simulación, escenarios de cálculo y opciones generales de simulación.

III.4.3. Calibración del modelo

Con las simulaciones para las secciones obtenidas con los distintos MDE y con los resultados obtenidos, estos se compararon con los valores de nivel de agua en la sección de control correspondiente a la estación hidrométrica 28003 “Cardel” ya que de acuerdo a Ramos y Mejía (2012), el Cuerpo de Ingenieros de EEUU considera calibrado el modelo cuando se consigue una diferencia ± 20 cm entre el nivel de agua registrado y el nivel de agua calculado, por lo cual si esta condición no se cumplía, se cambiaron los valores del coeficiente n de rugosidad de Manning y se realizaron nuevas simulaciones hasta que la condición de los ± 20 cm se cumpliera.

III.4.4. Obtención de las áreas de inundación

Para la obtención de los mapas de inundación se importó la información obtenida de la simulación en HEC-RAS al programa ArcMap, en el cual mediante la opción *RAS Mapping* de la extensión HEC-GeoRAS se generó de manera automatizada las áreas de

inundación a partir de la creación de un modelo raster al ser interpolados los valores de las secciones transversales del nivel de agua simulados en HEC-RAS.

III.5. Comparación de las áreas de inundación obtenidas

Se realizó el análisis de los resultados obtenidos en las simulaciones con cada uno de los MDE, siendo estas evaluadas mediante áreas de inundación identificadas en la zona.

Las áreas de inundación reales ocurridas en la zona se obtuvieron mediante análisis de imágenes de satélite. Para la zona de estudio se contó con imágenes RapidEye de octubre de 2010 las cuales son post evento de la inundación ocurrida por el desbordamiento del río La Antigua durante el paso del Huracán Karl, debido a esto, las áreas inundadas se obtuvieron mediante el análisis de la reflectancia de los elementos afectados (suelo y vegetación principalmente).

Las áreas de inundación provenientes de las imágenes de satélite y las obtenidas mediante la simulación en HEC-RAS con los cuatro MDE fueron comparadas en cuanto a su similitud en extensión obtenida mediante la utilización de la medida de bondad de ajuste propuesta por Horrit (2006):

$$F = \frac{Num(S_{mod} \cap S_{obs})}{Num(S_{mod} \cup S_{obs})} \times 100 \quad (41)$$

Donde F es el % de coincidencia, S_{mod} y S_{obs} son los conjuntos de dominio de las subregiones (píxeles, elementos o celdas) modeladas y observadas y N es el número de elementos del conjunto (\cdot) .

Así también se realizó un análisis comparativo entre las propias áreas inundadas obtenidas de las simulaciones por lo cual para realizar esto, las “áreas observadas” de la medida de bondad de ajuste correspondieron a las “áreas simuladas” del modelo a comparar.

IV. RESULTADOS

IV.1. Hidrogramas en HEC-HMS

Las estaciones climatológicas utilizadas para la generación de los polígonos de Thiessen fueron 23, siendo solo 14 de ellas las que tuvieron una influencia dentro de la cuenca y para las cuales, en la Tabla 3 se muestra la precipitación que registraron el 17 de septiembre de 2010, fecha en la cual ocurrió la precipitación que propició el evento de inundación del río La Antigua.

Tabla 3. Precipitación registrada el 17 de septiembre de 2010 en las estaciones climatológicas con influencia dentro de la cuenca del río La Antigua.

Clave	Nombre	Longitud	Latitud	Precipitación (mm)
30021	Carrizal	-96.500	19.333	200.4
30026	Coatepec	-96.950	19.450	128.0
30087	Las Animas	-96.917	19.533	3.0
30137	Puente Nacional (CFE)	-96.400	19.333	340.0
30140	Rancho Viejo	-96.750	19.467	172.0
30141	Rinconada	-96.550	19.350	138.0
30175	Tembladeras	-97.117	19.500	183.0
30178	Tenextepec	-97.267	19.483	91.0
30179	Teocelo	-96.967	19.383	82.5
30187	Totutla	-96.950	19.233	271.5
30193	José Cardel	-96.383	19.383	150.9
30339	Cerro Gordo	-96.667	19.417	216.7
30342	Centro Regional Huatusco	-96.950	19.150	191.0
30452	Briones	-96.949	19.508	120.2

Con la información proveniente de las 14 estaciones climatológicas con influencia en la cuenca del río La Antigua y utilizando el método Número de Curva del SCS para las pérdidas, el del Hidrograma Unitario del SCS para las transformaciones y el de Muskingum para el tránsito de las avenidas, dentro del programa HEC-HMS, se obtuvieron los hidrogramas requeridos como condiciones de frontera para las simulaciones en HEC-RAS, siendo estos calibrados con los hidrogramas de la estación hidrométrica Cardel (Figura 20).

Como se puede observar en la Figura 20, el hidrograma generado en HEC-HMS después de realizada la calibración presentó valores correspondientes a gasto pico y el tiempo en que este ocurre muy similares al del hidrograma observado en la estación hidrométrica Cardel, sin embargo el volumen de escurrimiento total tuvo una mayor variabilidad. El gasto pico obtenido con el HEC-HMS fue de 6,011.6 m³/s, mientras que el tiempo en que este ocurre fue a las 04:00 horas del 18 de septiembre.

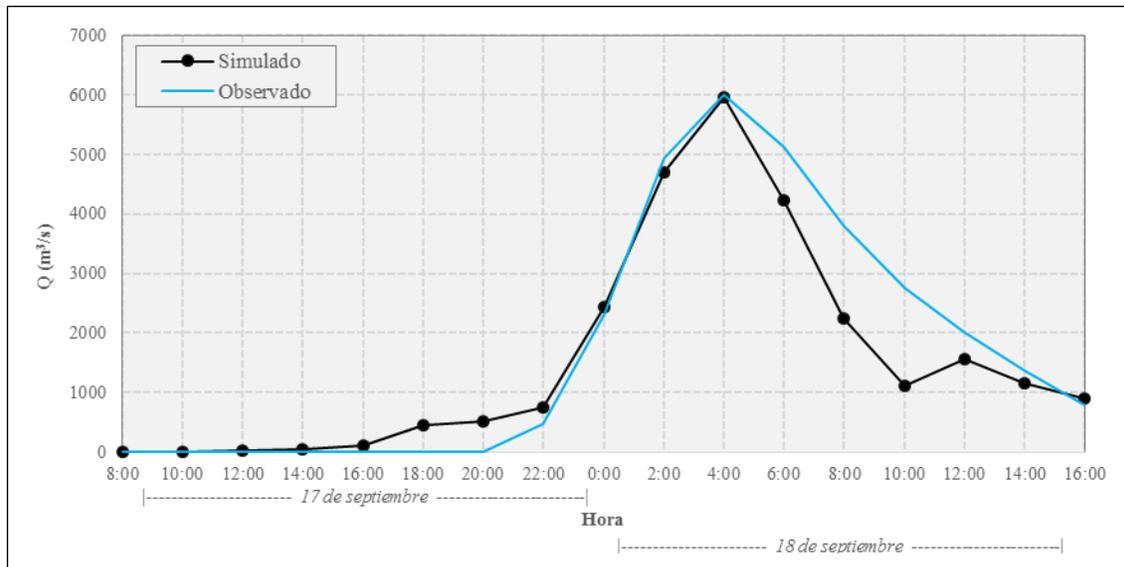


Figura 20. Comparativa entre el hidrograma observado y el simulado con HEC-HMS para el punto de control ubicado en la estación hidrométrica Cardel.

IV.2. Cauces y secciones transversales

Las longitudes de los cauces obtenidos para las simulaciones fueron muy similares entre el CEM 2.0 y el CEM 3.0, presentando las máximas diferencias en las longitudes obtenidas para el río La Antigua, la cual fue de 700 m, mientras que para los ríos Santa María y La Bomba las diferencias fueron de tan solo 200 m. La similitud con respecto a las longitudes obtenidas es debido principalmente a que los dos MDE provienen de la misma información (continuos nacionales de curvas de nivel, cuerpos de agua, red hidrográfica, bancos de nivel y vértices geodésicos), incluso como se describió anteriormente, el CEM 3.0 es una versión actualizada del CEM 2.0 cuya principal diferencia es el cambio de resolución de 30 metros a 15 metros. Por otro lado, la longitud de los cauces obtenidos con la cartografía

LIDAR fue en promedio mayor de 2.0 km que el de los CEM 2.0 y 3.0 (Tabla 4), lo cual refleja el grado de detalle con el que puede ser representada la topografía con este tipo de tecnología, de manera que puede identificar los pequeños cambios de elevación que se encuentran en las llanuras de inundación, permitiendo definir claramente el trayecto de los ríos.

Tabla 4. Longitudes obtenidas con los diferentes MDE para los ríos simulados.

MDE	Longitud (km)			
	Río La Antigua	Río Santa María	Río La Bomba	Total
Cartografía LIDAR	50.1	35.0	26.6	111.7
MDE 1:20,000	45.6	33.4	25.3	104.3
CEM 3.0	48.8	33.1	24.7	106.7
CEM 2.0	48.1	33.3	24.5	105.9

Los cauces derivados del MDE obtenido de la interpolación de las curvas de nivel 1:20,000 (MDE 1:20,000) presentaron longitudes similares a los generados con los CEM 2.0 y CEM 3.0 para los ríos Santa María y La Bomba, siendo sus diferencias menores a 1.0 km. Por otro lado, la longitud del río La Antigua que se obtuvo con el MDE 1:20,000 fue la menor de los cuatro MDE evaluados, con una diferencia máxima de 4.5 km con respecto a la obtenida con la cartografía LIDAR y siendo la mínima de 2.5 km comparada con la del CEM 2.0.

Las principales diferencias en las longitudes de los cauces obtenidos con los distintos MDE ocurrieron en las áreas con poca variabilidad altitudinal, como lo son llanuras de inundación o valles, condiciones que se presentan principalmente en el río La Antigua por lo cual a diferencia de los otros dos ríos, este fue el que obtuvo la mayor variabilidad en las longitudes obtenidas. Un ejemplo se representa en la Figura 21, en donde se observa una alta similitud en los cauces generados por los CEM 2.0 y CEM 3.0 así como por el de la cartografía LIDAR, siendo el cauce generado del MDE 1:20,000 el que difiere sustancialmente de las demás trayectorias. La variación del cauce generado del MDE 1:20,000 fue debido a que las curvas de nivel con las cuales este se creó tienen una equidistancia de 10 m, por lo que es común que al generar la interpolación de estas, no

representen correctamente la topografía en áreas con poca variabilidad altitudinal, incluso aquellas áreas que sus desniveles sean menores de 10 metros.

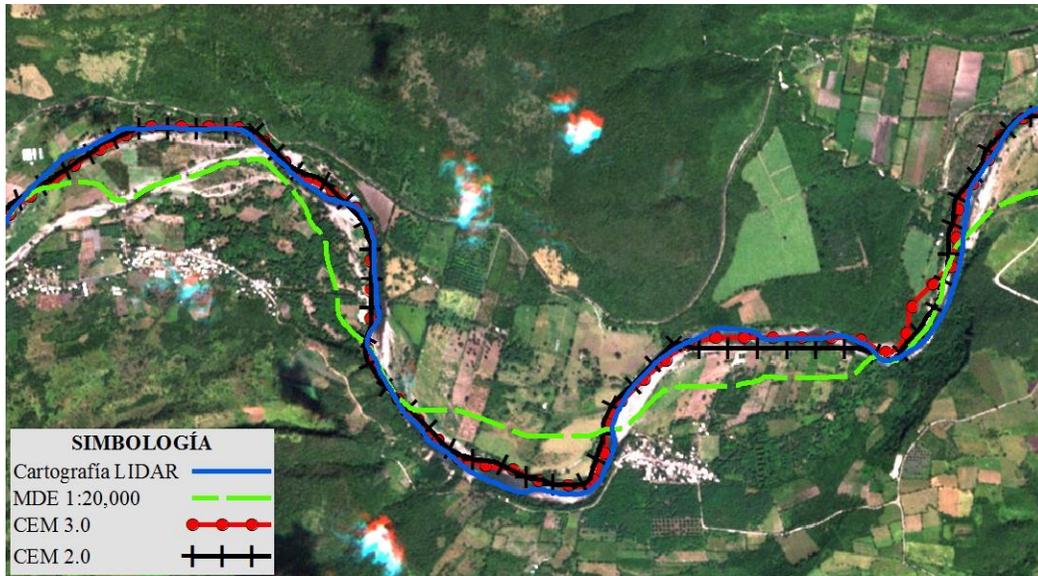


Figura 21. Comparativa de los cauces generados por los diferentes MDE en un área con llanura de inundación.

Debido a las diferencias en las longitudes obtenidas con los MDE, el número de secciones generadas para las simulaciones fueron distintas; con la cartografía LIDAR se obtuvieron 2,340 secciones, con una equidistancia en promedio de 50 m entre cada una de ellas y con anchos de 800 metros, mientras que para el CEM 3.0 las secciones fueron 2,240, el CEM 2.0 fueron 2,200 y 2180 con el MDE 1:20,000, todas ellas con equidistancias y anchos similares a las de la cartografía LIDAR.

Además de un mayor número de secciones en la cartografía LIDAR lo que más destacó fue que la obtención de la geometría de las secciones requirió de un mayor tiempo que el de los otros tres MDE, debido a que como el cauce presentaba más “sinuosidad” la ubicación de las secciones fue más complicada ya que estas se cruzaban entre ellas y eso representaba errores que al momento de obtener las áreas de inundación estas resultaban incompletas.

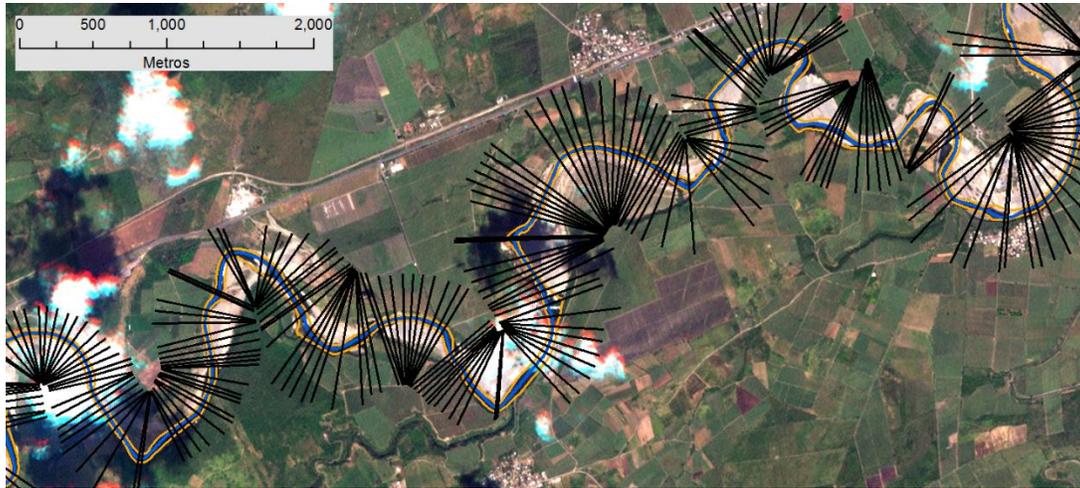


Figura 22. Geometría obtenida para el río La Antigua y correspondiente a XS Cut Lines, Stream Centerline y Line Bank.

Con respecto a las diferencias en las elevaciones de los ríos simulados, en la Figura 23 se muestran los perfiles longitudinales del río La Antigua obtenidos con los diferentes MDE. La diferencia en las elevaciones entre cada uno de los perfiles es notoria, principalmente al comparar los valores obtenidos con la cartografía LIDAR y el MDE 1:20,000 con respecto a los generados con los CEM en sus versiones 2.0 y 3.0, presentando diferencias en sus elevaciones de hasta 76 m (Tabla 5).

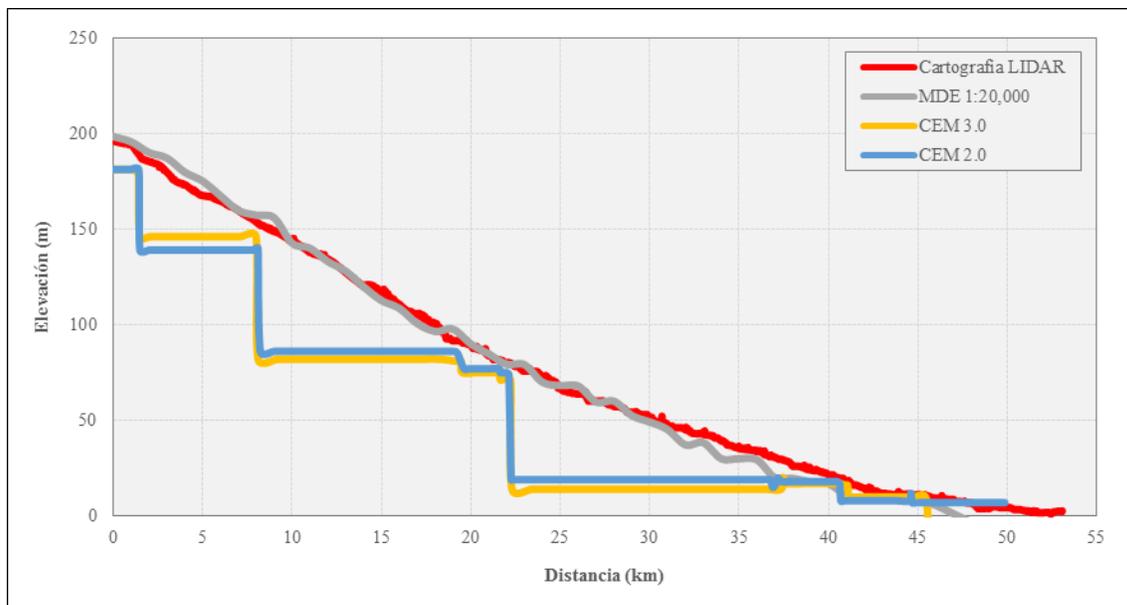


Figura 23. Perfiles longitudinales del río La Antigua obtenidos con los diferentes MDE.

Considerando la información de la Tabla 5, las mayores diferencias en las elevaciones del río La Antigua corresponden principalmente a las obtenidas con los MDE 1:20,00 y CEM 3.0, siendo el MDE 1:20,000 el que presenta en promedio las mayores elevaciones y el CEM 3.0 las menores.

Tabla 5. Elevaciones obtenidas con los diferentes MDE en algunos puntos del río La Antigua.

Cota ¹ (km)	Elevaciones (m)				Máxima	Diferencias (m)		
	Cartografía LIDAR	MDE 1:20,000	CEM 3.0	CEM 2.0		MDE	Mínima	MDE
0.0	196.5	198.2	181.0	181.0	17.2	1:20, 000 y CEM	0.0	CEM 2.0 y CEM 3.0
1.5	187.9	191.8	146.0	139.0	52.8	1:20,000 y CEM 2.0	3.9	LIDAR y 1:20,000
8.6	150.7	157.7	82.0	86.0	75.7	1:20,000 y CEM 3.0	4.0	CEM 3.0 y CEM 2.0
10.0	143.7	157.2	82.0	86.0	75.2	1:20,000 y CEM 3.0	4.0	CEM 3.0 y CEM 2.0
20.0	89.2	94.7	81.0	85.0	13.7	1:20,000 y CEM 3.0	4.0	CEM 3.0 y CEM 2.0
20.3	87.4	92.1	75.0	77.0	17.1	1:20,000 y CEM 3.0	2.0	CEM 3.0 y CEM 2.0
23.2	75.8	85.2	14.0	19.0	71.2	1:20,000 y CEM 3.0	5.0	CEM 3.0 y CEM 2.0
30.0	51.7	55.5	14.0	19.0	41.5	1:20,000 y CEM 3.0	5.0	CEM 3.0 y CEM 2.0
39.6	23.0	29.5	17.0	18.0	12.5	1:20,000 y CEM 3.0	1.0	CEM 3.0 y CEM 2.0
40.0	21.7	26.9	17.0	18.0	9.9	1:20,000 y CEM 3.0	1.0	CEM 3.0 y CEM 2.0
43.4	11.6	16.9	10.0	8.0	8.9	1:20,000 y CEM 2.0	1.6	LIDAR y CEM 3.0
48.0	6.8	7.3	-6.0	7.0	13.3	1:20,000 y CEM 3.0	0.3	1:20,000 y CEM 2.0
50.0	4.4	9.0	-6.0	7.0	15.0	1:20,000 y CEM 3.0	2.0	1:20,000 y CEM 2.0
53.1	2.5	3.3	-6.0	7.0	9.3	1:20,000 y CEM 3.0	0.8	LIDAR y 1:20,000

¹ Acotamiento referente al río La Antigua obtenido con la cartografía LIDAR.

La forma del perfil longitudinal del río La Antigua obtenidos con el CEM 2.0 y 3.0 es muy similar, sin embargo, presentan diferencias en sus elevaciones en algunos tramos como en las partes más bajas de hasta 13 m.

Por otro lado, los perfiles longitudinales obtenidos con la cartografía LIDAR y el MDE 1:20,000 también presentaron cierta similitud entre ellos, pero al igual que en el caso de los CEM, estos presentaron diferencias considerables en sus elevaciones, siendo estas en promedio de 5.2 m.

Además de las diferencias en las elevaciones mostradas en la Figura 23 y Tabla 5, también se puede observar que en el río La Antigua los CEM muestran elevaciones

constantes durante largos tramos del cauce (más de 5 km), después de los cuales presentan cambios abruptos de elevación, siendo algunos de ellos hasta de 64 m (Figura 24).

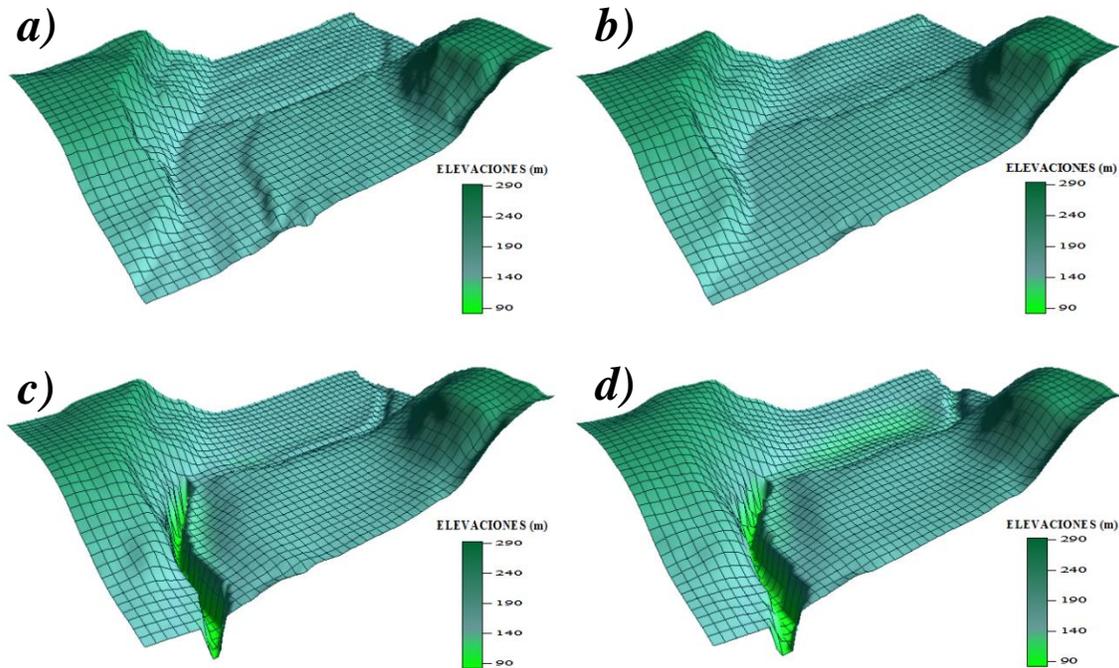


Figura 24. Representación del tramo del río La Antigua en donde se identificó el mayor desnivel en las elevaciones del cauce, a) Cartografía LIDAR, b) MDE 1:20,000, c) CEM 3.0 y d) CEM 2.0.

En cuanto a las diferencias de las elevaciones obtenidas para los ríos Santa María y La Bomba, en la Figura 25 se presentan los perfiles longitudinales del río Santa María obtenidos con los cuatro MDE y en la Tabla 6 sus diferencias en sitios específicos de su trayectoria, y en la Figura 26 los perfiles correspondientes al río La Bomba y sus diferencias en la Tabla 7. En estas figuras y tablas se puede observar que los perfiles de los ríos Santa María y La Bomba obtenidos con el CEM 2.0 y CEM 3.0 son muy similares, siendo estos los que presentaron las menores elevaciones.

Los perfiles longitudinales obtenidos con la cartografía LIDAR tuvieron una mayor similitud con los perfiles obtenidos con el MDE 1:20,000, principalmente para el río Santa María, en el cual los principales cambios en sus elevaciones se dieron a partir del kilómetro 19 hasta el kilómetro 27, después de los cuales las diferencias fueron mucho menores.

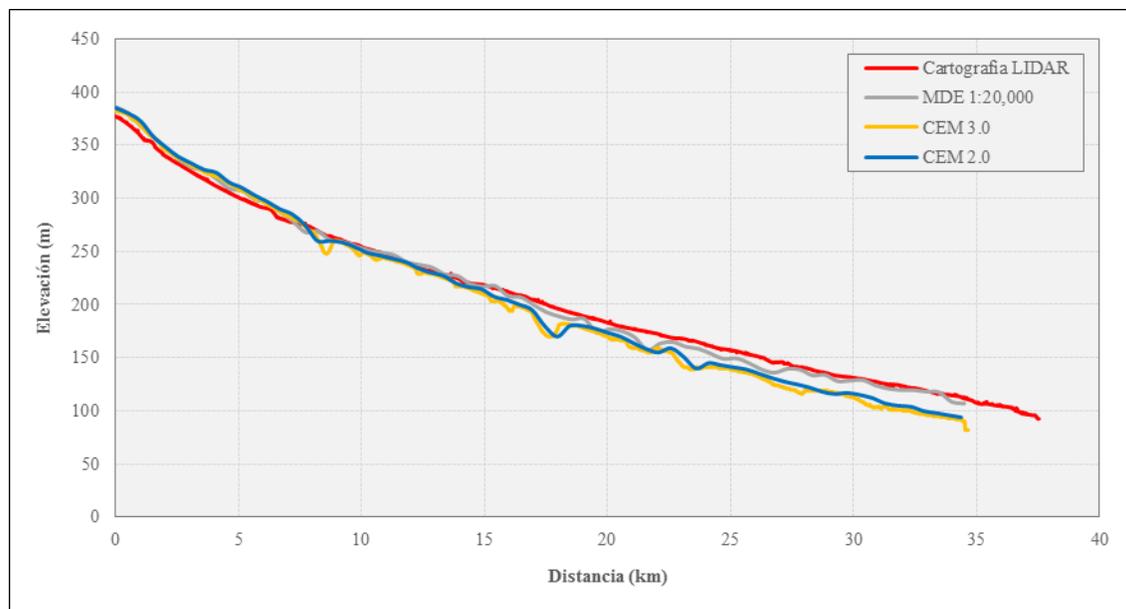


Figura 25. Perfiles longitudinales del río Santa María obtenidos con los diferentes MDE.

Tabla 6. Elevaciones obtenidas con los diferentes MDE en algunos puntos del río Santa María.

Cota ¹ (km)	Elevaciones (m)				Diferencias (m)			
	Cartografía LIDAR	MDE 1:20,000	CEM 3.0	CEM 2.0	Máxima	MDE	Mínima	MDE
0.0	377.1	386.3	383.0	384.0	9.2	LIDAR y 1:20,000	1.0	CEM 3.0 y CEM 2.0
2.5	333.0	338.7	341.0	343.0	10.0	LIDAR y CEM 2.0	2.0	CEM 3.0 y CEM 2.0
5.0	300.8	308.0	312.0	313.0	12.2	LIDAR y CEM 2.0	1.0	CEM 3.0 y CEM 2.0
7.0	275.9	279.5	281.0	284.0	8.1	LIDAR y CEM 2.0	1.5	1:20,000 y CEM 3.0
10.0	254.5	257.9	257.0	259.0	4.5	LIDAR y CEM 2.0	0.9	1:20,000 y CEM 3.0
12.5	233.3	238.7	240.0	241.0	7.7	LIDAR y CEM 2.0	1.0	CEM 3.0 y CEM 2.0
15.0	218.3	220.1	216.0	218.0	4.1	1:20,000 y CEM 3.0	0.3	LIDAR y CEM 2.0
17.5	200.4	203.7	199.0	200.0	4.7	1:20,000 y CEM 3.0	0.4	LIDAR y CEM 2.0
17.6	199.2	199.6	199.0	200.0	1.0	CEM 3.0 y CEM 2.0	0.2	LIDAR y CEM 3.0
17.9	189.0	174.8	166.0	167.0	23.0	LIDAR y CEM 3.0	1.0	CEM 3.0 y CEM 2.0
18.2	194.6	195.5	194.0	192.0	3.5	1:20,000 y CEM 2.0	0.6	LIDAR y CEM 3.0
20.0	183.0	186.7	180.0	181.0	6.7	1:20,000 y CEM 3.0	1.0	CEM 3.0 y CEM 2.0
22.5	169.4	164.1	160.0	162.0	9.4	LIDAR y CEM 3.0	2.0	CEM 3.0 y CEM 2.0
23.1	167.8	161.5	156.0	157.0	11.8	LIDAR y CEM 3.0	1.0	CEM 3.0 y CEM 2.0
23.7	164.6	169.9	155.0	155.0	14.9	1:20,000 y CEM 2.0	0.0	CEM 3.0 y CEM 2.0
25.0	157.0	159.0	141.0	145.0	18.0	1:20,000 y CEM 3.0	2.0	LIDAR y 1:20, 000
27.5	142.4	143.7	137.0	139.0	6.7	1:20,000 y CEM 3.0	1.3	LIDAR y 1:20, 000
30.0	131.3	134.4	118.0	125.0	16.4	1:20,000 y CEM 3.0	3.1	LIDAR y 1:20, 000
32.5	121.8	126.1	111.0	114.0	15.1	1:20,000 y CEM 3.0	3.0	CEM 3.0 y CEM 2.0
35.0	107.5	117.3	99.0	101.0	18.3	1:20,000 y CEM 3.0	2.0	CEM 3.0 y CEM 2.0

¹ Acotamiento referente al río Santa María obtenido con la cartografía LIDAR.

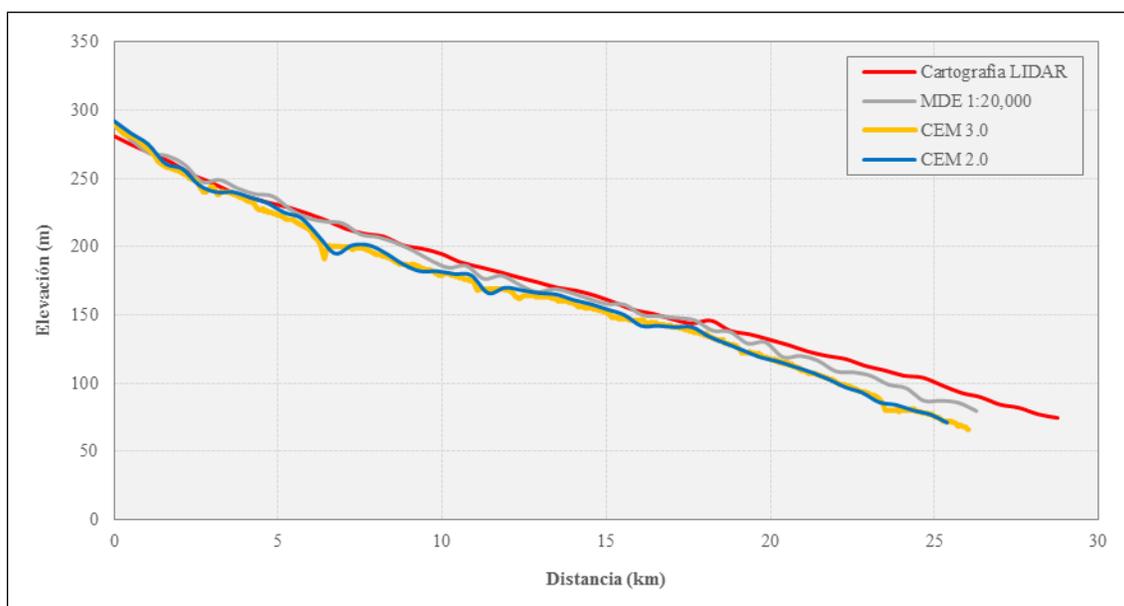


Figura 26. Perfiles longitudinales del río La Bomba obtenidos con los diferentes MDE.

Tabla 7. Elevaciones obtenidas con los diferentes MDE en algunos puntos del río La Bomba.

Cota ¹ (km)	Elevaciones (m)				Diferencias (m)			
	Cartografía LIDAR	MDE 1:20,000	CEM 3.0	CEM 2.0	Máxima	MDE	Mínima	MDE
0.0	281.4	278.7	284.0	285.0	6.3	1:20, 000 y CEM 2.0	1.0	CEM 3.0 y CEM 2.0
2.5	253.0	247.4	245.0	243.0	10.0	LIDAR y CEM 2.0	2.0	CEM 3.0 y CEM 2.0
5.0	230.7	236.9	226.0	229.0	10.9	1:20,000 y CEM 3.0	1.7	LIDAR y CEM 2.0
7.1	212.3	216.4	191.0	186.0	30.4	1:20,000 y CEM 2.0	4.1	LIDAR y 1:20, 000
7.5	210.7	216.9	200.0	200.0	16.9	1:20,000 y CEM 2.0	0.0	CEM 3.0 y CEM 2.0
10.0	194.7	195.2	187.0	181.0	14.2	1:20,000 y CEM 2.0	0.5	LIDAR y 1:20, 000
12.5	176.7	175.6	170.0	165.0	11.7	LIDAR y CEM 2.0	1.1	LIDAR y 1:20, 000
15.0	161.5	165.8	161.0	162.0	4.8	1:20,000 y CEM 3.0	0.5	LIDAR y CEM 3.0
17.5	144.2	155.3	147.0	146.0	11.1	LIDAR y 1:20, 000	1.0	CEM 3.0 y CEM 2.0
20.0	131.6	137.2	136.0	140.0	8.4	LIDAR y CEM 2.0	1.2	1:20,000 y CEM 3.0
22.5	114.6	117.1	117.0	118.0	3.4	LIDAR y CEM 2.0	0.1	1:20,000 y CEM 3.0
25.0	98.5	107.2	99.0	101.0	8.7	LIDAR y 1:20, 000	0.5	LIDAR y CEM 3.0
27.5	82.2	88.5	80.0	82.0	8.5	1:20,000 y CEM 3.0	0.2	LIDAR y CEM 2.0

¹ Acotamiento referente al río La Bomba obtenido con la cartografía LIDAR.

En los primeros 15 kilómetros del río Santa María, los perfiles longitudinales obtenidos con los cuatro MDE tuvieron las menores diferencias de elevaciones en toda su trayectoria, después de los cuales las diferencias entre las elevaciones fueron considerables,

principalmente entre los perfiles del CEM 2.0 y CEM 3.0 con respecto a los obtenidos con la cartografía LIDAR y el MDE 1:20,000. Por otro lado, en el río La Bomba, los perfiles de los cuatro MDE presentaron las menores diferencias en los primeros 5 km, después de los cuales las diferencias fueron mucho mayores que las obtenidas con el río Santa María.

De acuerdo a la Tabla 6 y Tabla 7, las mayores diferencias entre las elevaciones de los perfiles tanto del río Santa María como del río La Bomba se presentaron entre el CEM 3.0 y la cartografía LIDAR, mientras que las menores diferencias se dieron entre el CEM 2.0 y CEM 3.0.

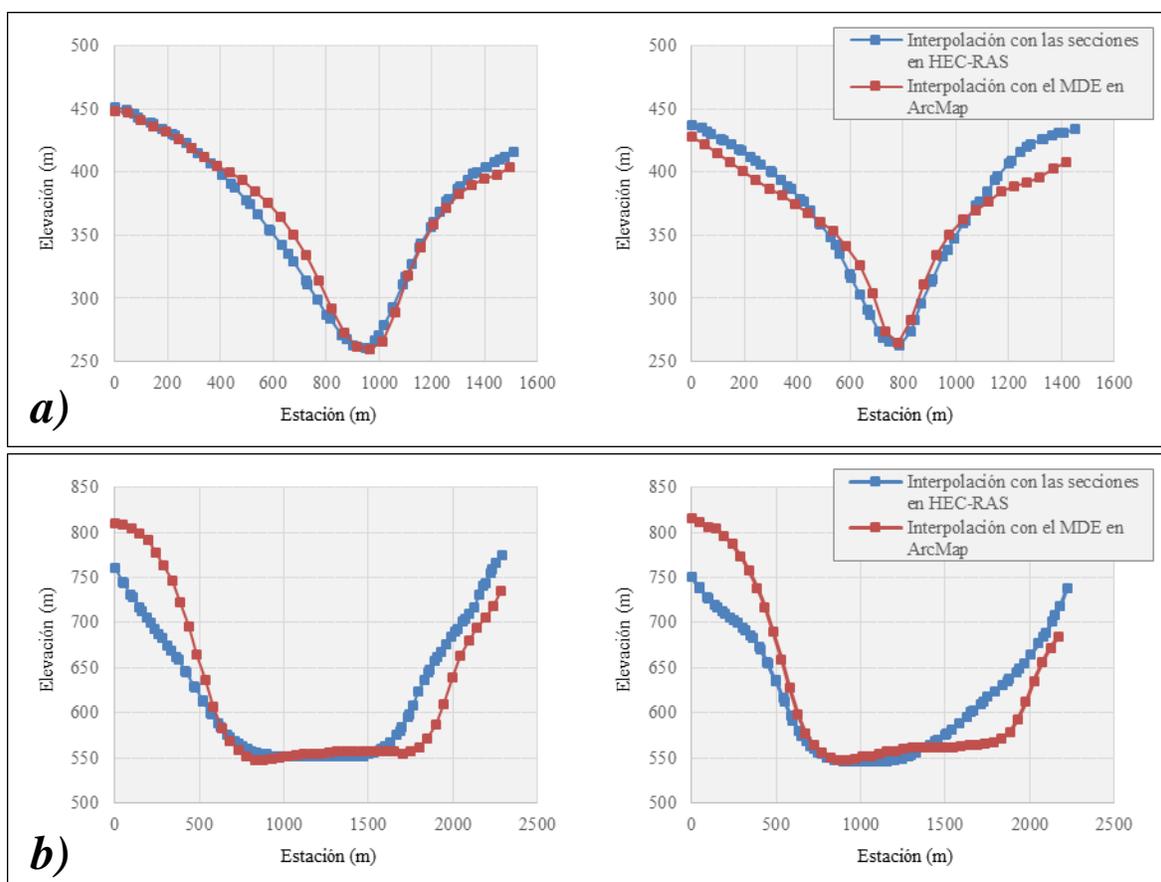


Figura 27. Diferencias en las secciones obtenidas con la interpolación en HEC-RAS y las generadas con los MDE en ArcMap para cauces con llanura de inundación: a) poco definida y b) definida.

Las secciones interpoladas de manera automatizada en HEC-RAS tuvieron importantes diferencias con respecto a sus valores obtenidos directamente de los MDE, como

se puede ver en las secciones de la Figura 27, las diferencias son más notables en las áreas donde se tiene una extensa llanura de inundación cambiando la forma de la sección y las elevaciones hasta en más de 50 m. Por otro lado, las secciones en las áreas del cauce que presentan márgenes más verticales, la forma de la sección se conserva, sin embargo, al igual que las en las zonas con llanura de inundación, las elevaciones varían, siendo en este caso de hasta 30 m.

Además de la comparativa de las secciones obtenidas con la interpolación en HEC-RAS y las generadas con los MDE en ArcMap, también se realizó una comparativa de las secciones con respecto a la modificación del MDE después de la aplicación de la herramienta *Fill Sinks*, la cual es necesaria para obtener las direcciones y acumulación de flujo y así generar la red hidrográfica a simular. Los resultados se muestran en las secciones de la Figura 28.

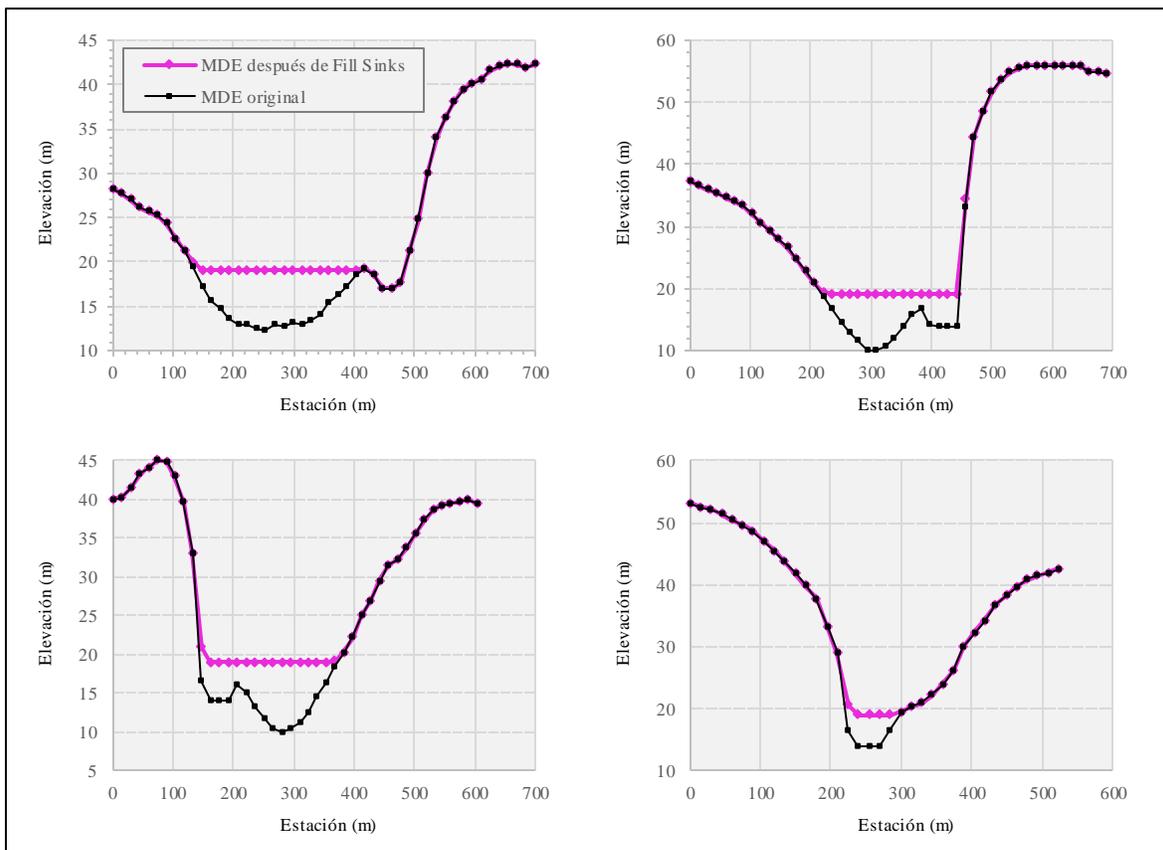


Figura 28. Diferencias en las secciones obtenidas con el MDE original y después de la aplicación de la herramienta *Fill Sinks*.

Las secciones obtenidas con el MDE después de aplicar la herramienta *Fill Sinks* muestran una eliminación por completa del fondo del cauce, esto debido a que la función de la herramienta *Fill Sinks* es rellenar las depresiones para dar continuidad con el flujo del escurrimiento generado aguas arriba, sin embargo, este cambio en las secciones es muy drástico, modificándolas por completo y generando condiciones del cauce que no son reales.

Durante el proceso de la creación de las secciones, además de la identificación de los errores en la generación de las secciones al utilizar el MDE después de aplicar la herramienta *Fill Sinks* y los producidos por la interpolación en HEC-RAS, se identificó otro error en los MDE, principalmente en el proveniente de la cartografía LIDAR. El error consistió en que en el agua, el rayo láser que se emite del emisor que compone el LIDAR es absorbido y no vuelve al sistema, por lo que no se genera información, y debido a lo cual al momento de generar el MDE, estas áreas obtienen los valores aproximados al nivel del agua, no permitiendo conocer el fondo del cauce.

El problema con el fondo de cauce, a pesar de que ocurre principalmente en tecnología que realiza las mediciones de las alturas mediante laser, también es posible observarlo en MDE generados a través de otros métodos, como lo es el de la interpolación de curvas de nivel provenientes de procesos fotogramétricos y debido a que los MDE utilizados son de este tipo y provenientes de cartografía LIDAR, fue necesario hacer una corrección del fondo del cauce.

La corrección del fondo del cauce se obtuvo utilizando información de un levantamiento topográfico del río La Antigua, un kilómetro aguas abajo de la ubicación de la estación hidrométrica (Figura 29), para lo cual se realizó un análisis de las secciones de ese tramo para generar una sección representativa del fondo del cauce con las condiciones presentes en el tramo a corregir. Esa sección se ajustó al ancho de las secciones a corregir conservando la relación entre el ancho y la profundidad de la sección original.

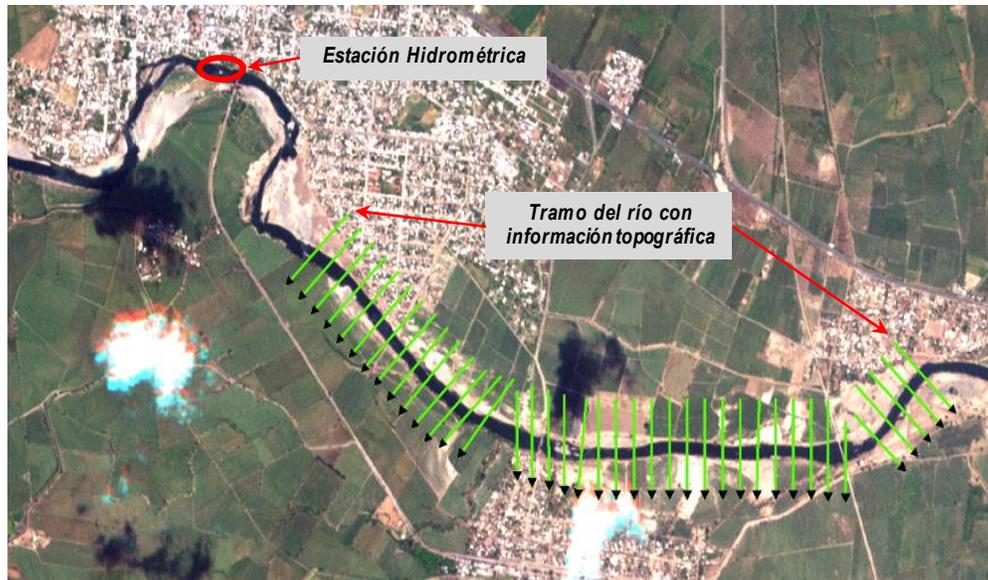


Figura 29. Tramo del río con información topográfica.

En la Figura 30, Figura 31, Figura 32 y Figura 33 se puede observar el cambio en el fondo del cauce en la sección en donde se ubica la estación hidrométrica Cardel, para cada uno de los MDE utilizados.

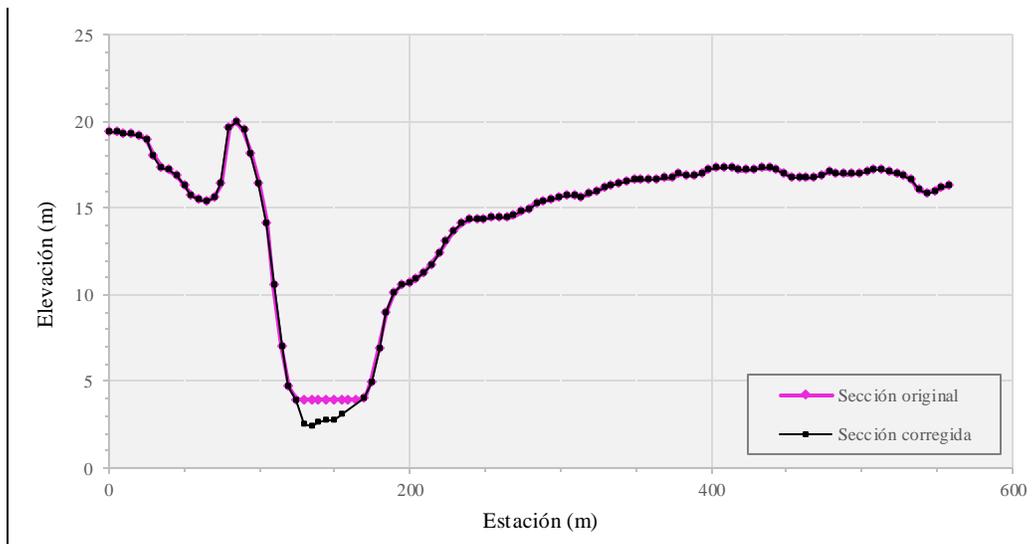


Figura 30. Sección original y corregida de la cartografía LIDAR en el punto de ubicación de la estación hidrométrica Cardel.

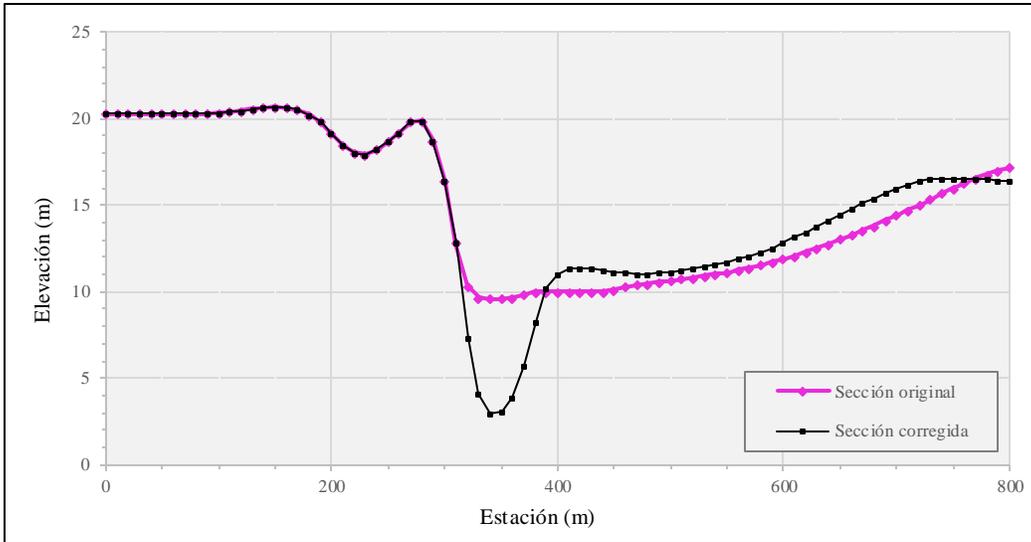


Figura 31. Sección original y corregida del MDE 1:20,000 en el punto de ubicación de la estación hidrométrica Cardel.

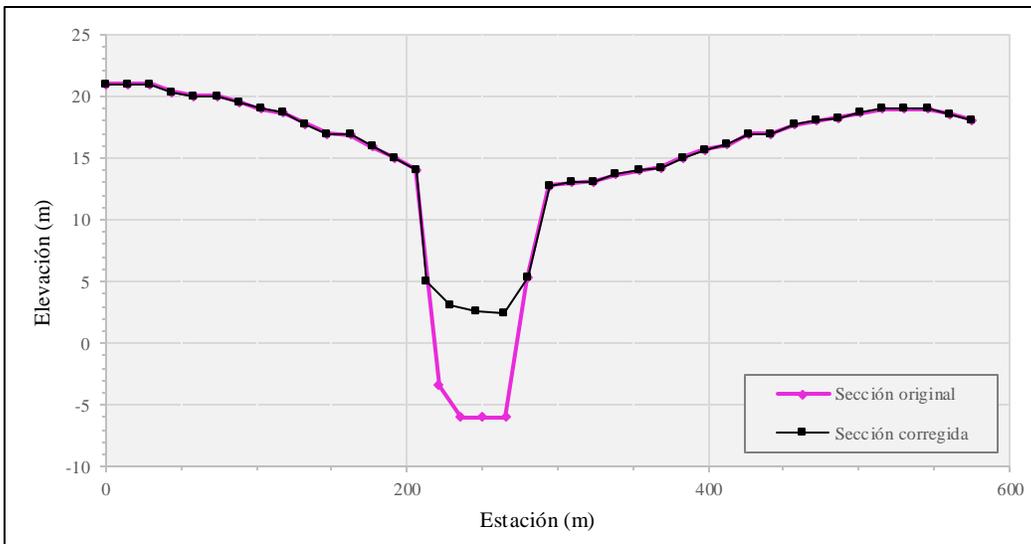


Figura 32. Sección original y corregida del CEM 3.0 en el punto de ubicación de la estación hidrométrica Cardel.

El fondo de la sección obtenida con la cartografía LIDAR cambio de 4 m a 2.5 m, mientras que la obtenida con el CEM 3.0 fue la que tuvo un mayor cambio al disminuir su profundidad de -6.0 m a 2.5 m.

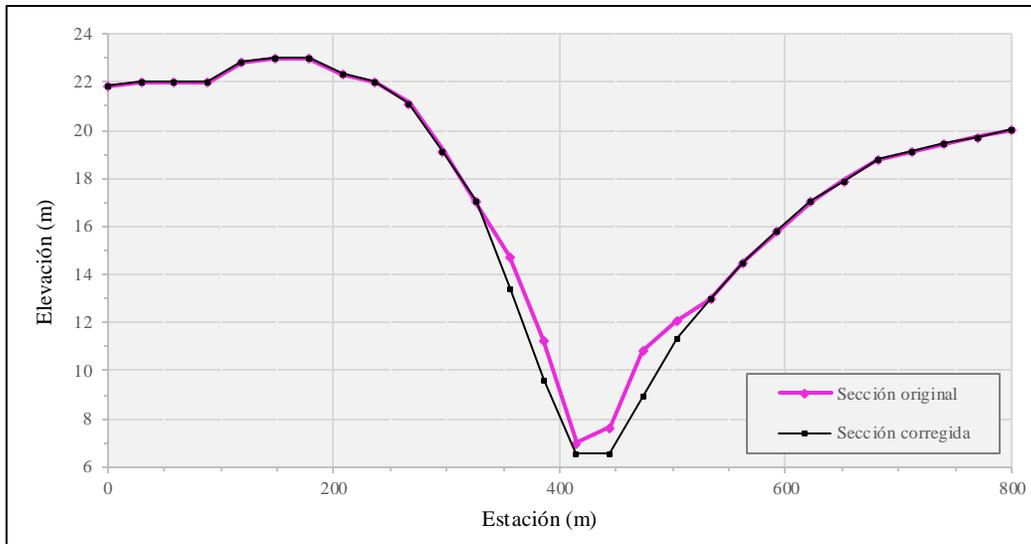


Figura 33. Sección original y corregida del CEM 2.0 en el punto de ubicación de la estación hidrométrica Cardel.

Las secciones originales obtenidas del CEM 3.0 mostraron la mayor variabilidad en cuanto a la profundidad con respecto a la de los demás MDE, presentando elevaciones de -6 m en el tramo cercano a la estación hidrométrica y en su trayecto posterior aguas abajo. Esta situación es de gran importancia debido a que este MDE fue creado apoyándose en cuerpos de agua, red hidrográfica, bancos de nivel y vértices geodésicos, los cual de acuerdo a lo observado, causa conflictos en las elevaciones al ser influenciada la interpolación en este tipo de elementos.

En el MDE 1:20,000 al igual que en el CEM 3.0, presentó un importante cambio en la profundidad de su sección, al aumentar esta de 9.8 m a 3 m, modificando significativamente los márgenes del cauce.

Con respecto a la sección del CEM 2.0 también se observó un cambio al corregir el fondo de 7 m a 6.5 m, sin embargo a diferencia de la sección del MDE 1:20,000, sus márgenes fueron modificados ligeramente.

Como se puede observar en la Figura 30, Figura 31, Figura 32 y Figura 33 las secciones tienen cierta similitud en su margen izquierda, pero no así en la margen derecha, principalmente la del MDE 1:20,000.

La diferencia de la margen derecha en la sección 1:20,000 reside en el origen del MDE, esto debido a que fue generado a través de curvas de nivel equidistantes a 10 m (Figura 34) que en esa zona presenta poca variabilidad altitudinal lo cual al momento de acotarlo a 10 m y realizar la interpolación no se va a aproximar a la realidad causando diferencias significativas en la geometría de las secciones obtenidas en esa área.



Figura 34. Curvas de nivel 1:20,000 en la sección de la estación hidrométrica Cardel.

Considerando el nivel máximo de agua registrado en la estación hidrométrica Cardel (15.56 m) se compararon las secciones que se obtuvieron directamente de los MDE y las corregidas (Figura 35), con la finalidad de observar los cambios en sus áreas hidráulicas y de esta manera conocer la influencia que tiene el tratamiento de las secciones provenientes de los MDE con respecto a la corrección del fondo del cauce.

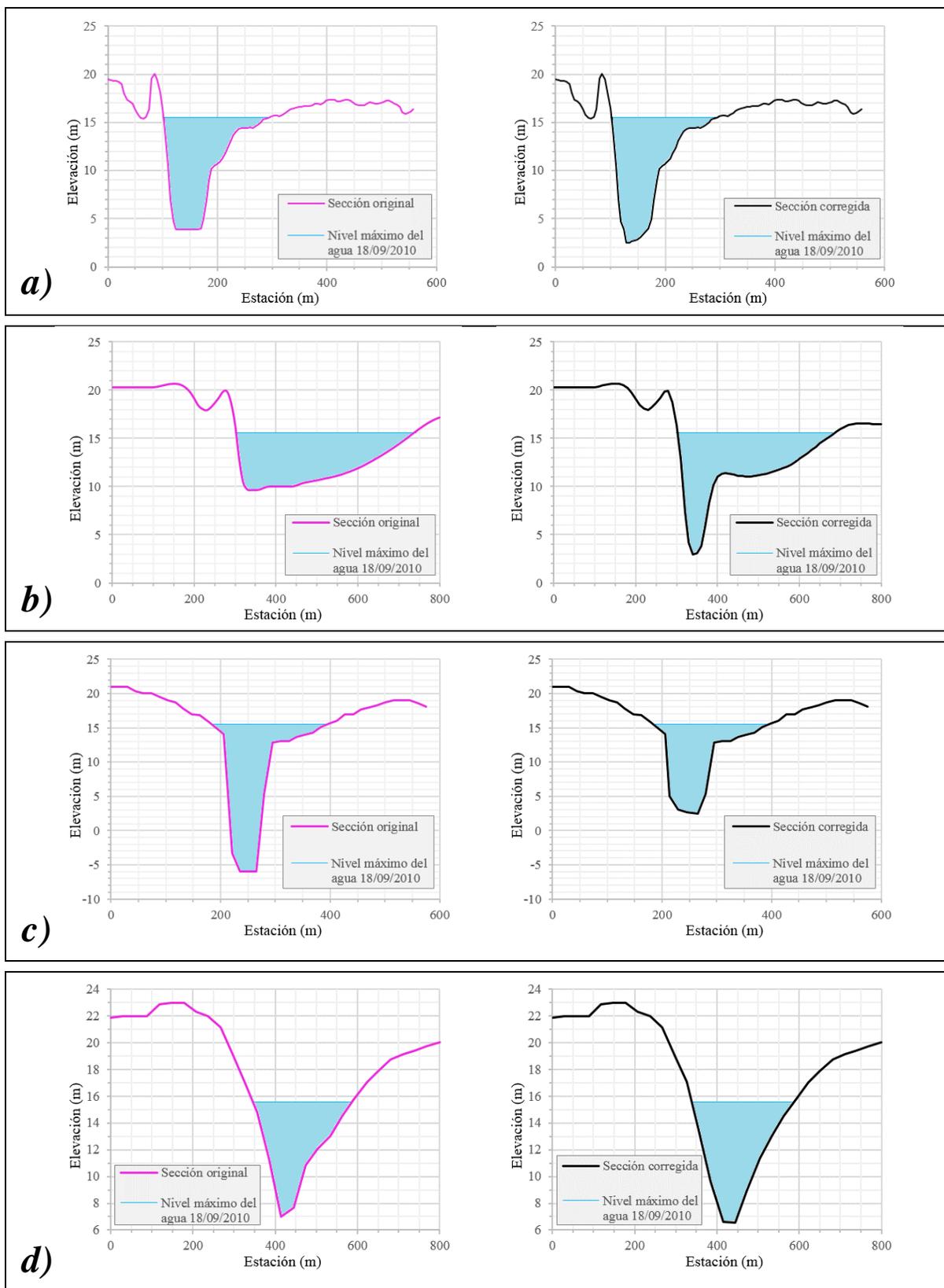


Figura 35. Área hidráulica de las secciones obtenidas de los MDE y después de realizar la corrección del fondo del cauce, para a) Cartografía LIDAR, b) MDE 1:20,000, c) CEM 3.0 y d) CEM 2.0.

Los principales cambios en las áreas hidráulicas se dieron en las secciones del MDE 1:20,000 y CEM 3.0, siendo el caso del segundo, el único que presentó una disminución de su área hidráulica, mientras que para el del 1:20,000 su aumento fue considerable. Las secciones obtenidas de la cartografía LIDAR y del CEM 2.0, no tuvieron cambios significativos.

El aumento o disminución del área hidráulica, es importante ya que de esta dependerá el volumen de agua que puede pasar por el río, si el área hidráulica es menor que la real, las simulaciones arrojarían una mayor área de inundación ya que al ser menor el área hidráulica menor sería la capacidad de drenaje del río, favoreciendo el aumento en el nivel del agua y por lo tanto el desbordamiento de los cauces. Por otro lado, si el área hidráulica es mucho mayor que la real, las simulaciones estarían sobrestimando las áreas de inundación, ya que al tener una mayor área hidráulica, más fácilmente el agua podría fluir, evitando el aumento repentino del nivel del agua y evitando de esta manera el desbordamiento de los cauces.

Con respecto a los valores iniciales de n de rugosidad de Manning en la parte central de los cauces, los valores fueron de 0.040, el cual corresponde a corrientes de montaña sin vegetación en el canal y con presencia en el fondo de grava, guijarros y cantos rodados, mientras que para los márgenes fue de 0.060, valor correspondiente a planicies de inundación con ligera presencia de malezas y árboles. Con el proceso iterativo de calibración estos valores cambiaron desde 0.020 para los márgenes y hasta 0.030 para la parte central del cauce.

IV.3. Caudales utilizados y niveles de agua

Los caudales y niveles de agua utilizados para calibrar el HEC-RAS fueron los de la estación hidrométrica 28003 “Cardel” (Tabla 8), obteniéndose que para el año de comparación correspondiente al 2010, los niveles del agua simulados con la cartografía LIDAR y CEM 2.0 fueron mayores por 4.9 cm y 4.6 cm respectivamente, mientras que para el MDE 1:20,000 y el CEM 3.0 fueron menores por 1.5 cm y 3.0 cm respectivamente, esto solo referente a la sección de control correspondiente a la estación hidrométrica Cardel.

Tabla 8. Caudales máximos y niveles de agua de la estación hidrométrica 28003.

Año	Gasto (m ³ /s)	Nivel (m)
1969	1,913.60	7.76
1970	824.57	5.00
1974	2,152.00	8.90
1979	1,388.00	6.14
1981	1,580.44	6.48
1984	1,923.70	7.38
1992	1,207.18	5.20
1993	2,568.00	8.33
1995	840.00	4.28
1999	2,279.57	8.30
2010	6,482.00	16.10

El evento utilizado para realizar la comparativa de las áreas de inundación fue el que se muestra en el Hidrograma de la Figura 36 y el cual corresponde al evento de inundación provocado por el Huracán Karl el cual fue uno de los mayores desastres ocurridos en la zona.

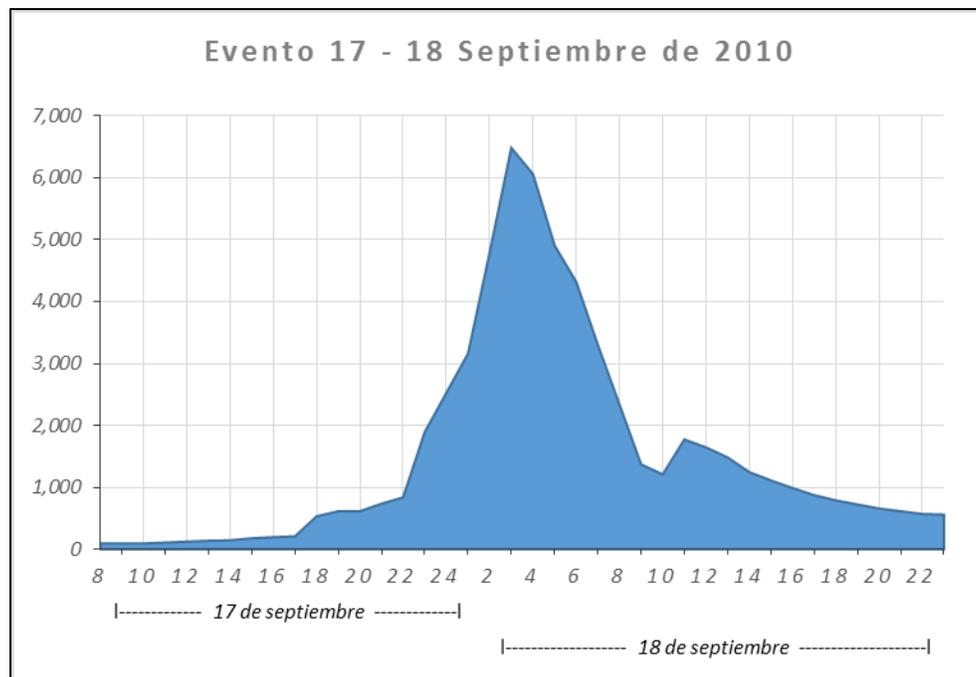


Figura 36. Hidrograma observado del evento de inundación en la estación hidrométrica Cardel.

IV.4. Áreas de inundación

Las áreas de inundación que sirvieron de base para realizar las comparaciones con las áreas obtenidas de los diferentes MDE se obtuvieron a través del análisis de imágenes de satélite RapidEye, correspondientes al mes de octubre de 2010, las cuales a pesar de ser de varios días después del evento de inundación, aún contenían la evidencia de los daños, principalmente reflejados en la vegetación (Figura 37). Además se apoyó en información levantada en campo como lo fue las marcas dejadas por el agua en las casas (Figura 38).



Figura 37. Área de inundación delimitada con imágenes de satélite RapidEye en los alrededores de la localidad El Coyolar y Juan Yobal Zerna, municipio de Puente Nacional, Veracruz.



Figura 38. Casa en la cual se observa hasta donde llegó el nivel del agua producto de la inundación por el desbordamiento del río La Antigua.

El área de inundación obtenida mediante el análisis de imágenes de satélite y con apoyo de información de campo fue de 2,263.8 ha, siendo las áreas con vegetación natural las de mayor afectación, y en menor parte las áreas agropecuarias y urbanas.

De acuerdo a las simulaciones realizadas con el modelo calibrado, se obtuvo que la menor área de inundación fue la del CEM 3.0 con una superficie de 1,705.0 ha, la cual presento un 53.7% de coincidencia con las áreas de inundación observadas en la imagen de satélite RapidEye. La superficie de la inundación con este MDE tuvo una coincidencia del 53.3% con la obtenida con la cartografía LIDAR y del 77.7% con las del CEM 2.0 (Tabla 9).

Tabla 9. Áreas de inundación para el evento ocurrido en septiembre del 2010.

MDE	Área (ha)	F ¹	F ²	F ³
INUNDACIÓN	2,263.8	-	77.0	55.0
Cartografía LIDAR	2,434.9	77.0	-	57.8
MDE 1:20,000	2,392.7	69.4	77.0	58.6
CEM 3.0	1,705.0	53.7	53.3	77.7
CEM 2.0	1,871.1	55.0	57.8	-

¹ Comparativa respecto a las áreas de inundación observadas, ² comparativa respecto a las áreas de inundación obtenidas con la cartografía LIDAR y ³ comparativa respecto a las áreas de inundación obtenidas con el CEM 2.0.

La cartografía LIDAR al igual que la del MDE 1:20,000 obtuvieron superficies similares de áreas de inundación, sin embargo, la obtenida con la cartografía LIDAR tuvo un 77.0% de coincidencia con las áreas de inundación observadas mientras que las del MDE 1:20,000 fue del 69.4%. Las áreas en común entre estos dos MDE fue del 77.0%.

Como se puede inferir de la Tabla 9 la área de inundación obtenida con el MDE 1:20,000 es más similar con el área obtenida con el MDE LIDAR que con la obtenida con el CEM 2.0, a pesar de que los MDE 1:20,000 y CEM 2.0 tienen una fuente de origen similar (curvas de nivel generadas a través de procesos fotogramétricos). Así también se puede observar que las áreas de inundación obtenidas con los CEM en su versiones 2.0 y 3.0 son similares en un 77.7%, siendo estas las de mayor similitud, sin embargo, fueron las que más

diferencia tuvieron con respecto a las áreas de inundación observadas (55.0% y 53.7% respectivamente).

En la Figura 39 y Figura 40 se muestran las áreas de inundación obtenidas con los distintos MDE en una zona en donde las diferencias fueron mínimas con respecto a las áreas de inundación observadas. El área comprende el tramo del río La Antigua desde los alrededores de la localidad de Guayabalito en el municipio de Puente Nacional hasta las localidades de Cabezas también del municipio de Puente Nacional y la localidad de El Manguito en el municipio de Paso de Ovejas.

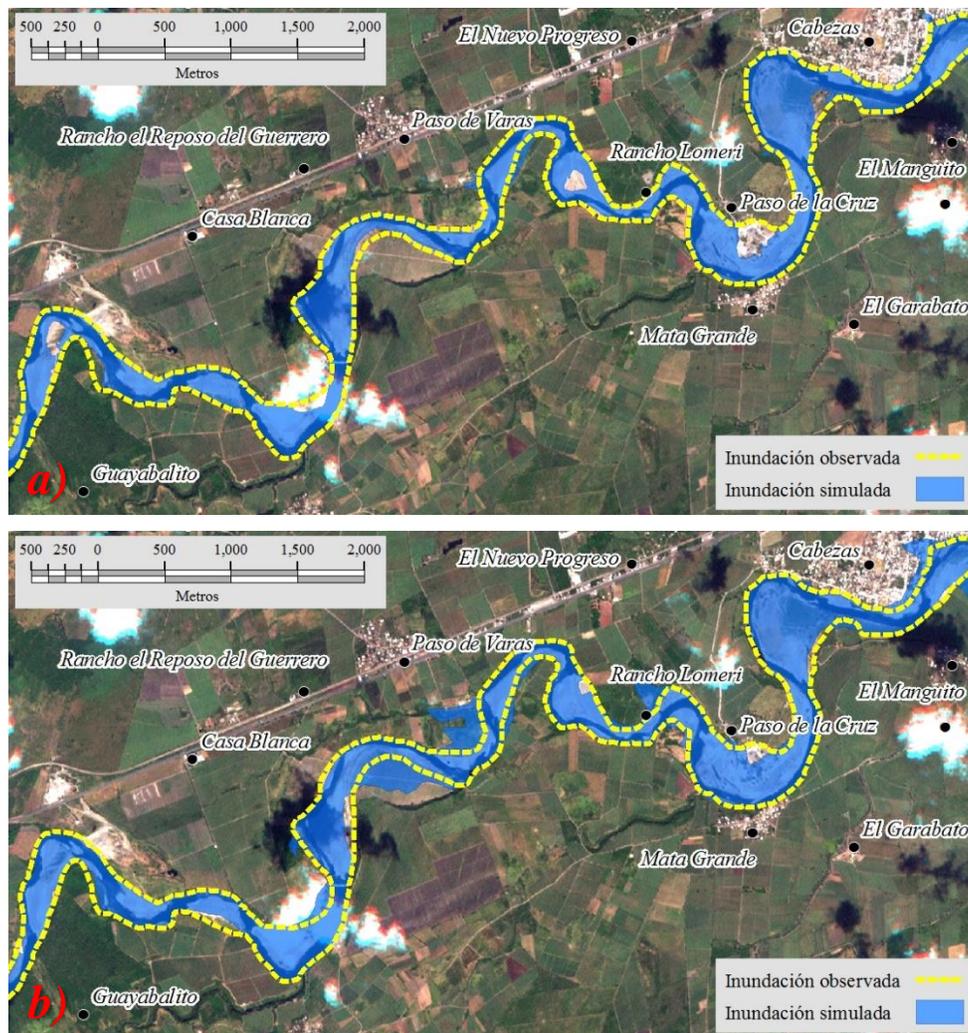


Figura 39. Detalle de las áreas de inundación obtenidas con a) Cartografía LIDAR y b) MDE 1:20,000, en una de las zonas en donde se obtuvo la menor variabilidad de las simulaciones con respecto a las inundaciones observadas.

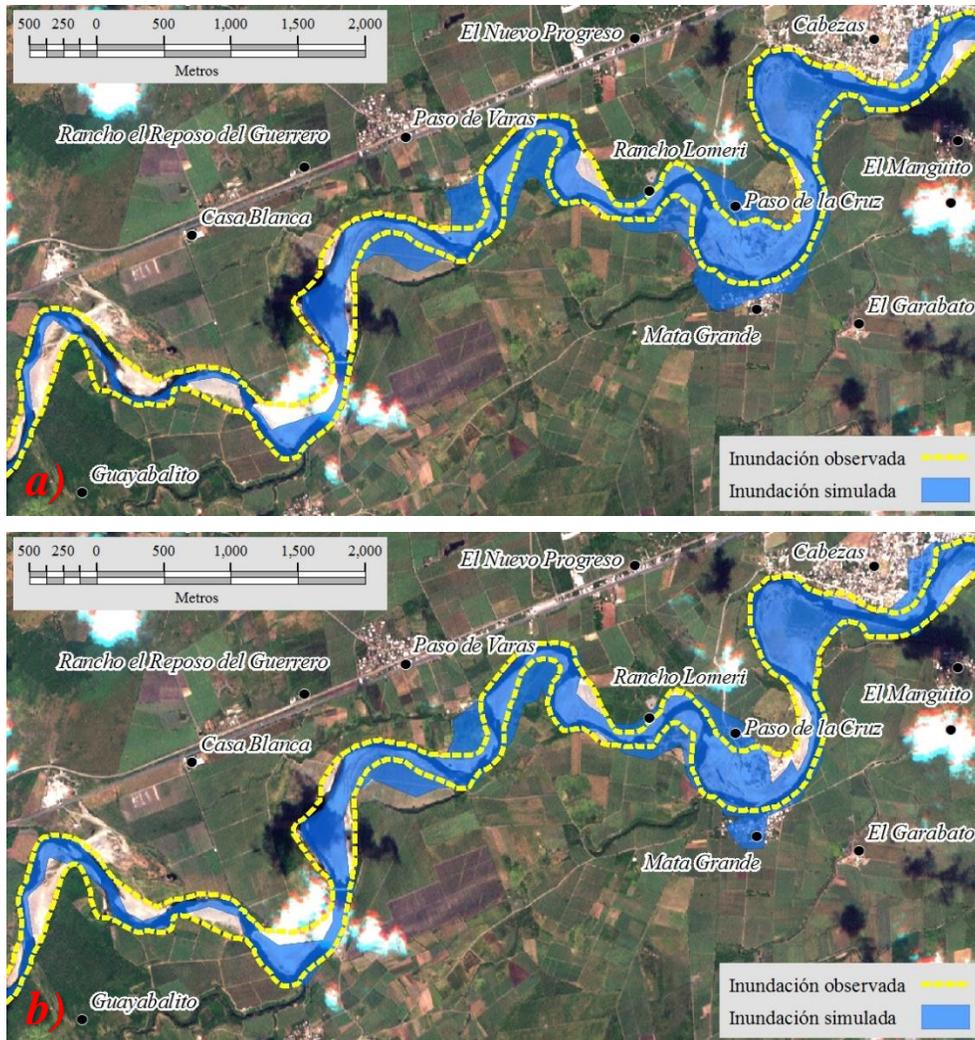


Figura 40. Detalle de las áreas de inundación obtenidas con a) CEM 3.0 y b) CEM 2.0, en una de las zonas en donde se obtuvo la menor variabilidad de las simulaciones con respecto a las inundaciones observadas.

Las áreas de inundación obtenidas con la cartografía LIDAR que se muestran en la Figura 39 a, son las que presentaron la menor diferencia con respecto a las áreas de inundación observadas. Las principales diferencias se localizan en los alrededores de las localidades de Rancho Lomeri y Paso de la Cruz.

Al igual que con la cartografía LIDAR, las áreas de inundación del MDE 1:20,000 fueron muy similares con respecto a las observadas para la zona mostrada en la Figura 39 b, siendo identificadas las áreas cercanas a la localidad de Paso de Varas como las de mayor

variación. Esta área marcada como de inundación por el MDE 1:20,000 fue debido a que la variación altitudinal es menor de 10 metros, por lo que estas diferencias no son representadas por las curvas de nivel con las cuales se obtuvo el MDE, considerando el área como una zona plana y propiciando un error en la delimitación del área de inundación.

Las diferencias entre las áreas de inundación observadas y las simulaciones se distinguen más claramente en la Figura 40, en donde se muestran las simulaciones obtenidas con los CEM en sus versiones 2.0 y 3.0.

Las áreas de inundación tanto del CEM 2.0 y 3.0 incluyen la localidad de Mata Grande, área que no fue simulada como inundada en la cartografía LIDAR ni con el MDE 1:20,000 y que de acuerdo a las áreas de inundación observadas no presentó problemas por el desbordamiento del río.

La principal diferencia de las simulaciones obtenidas con los CEM fue en el área comprendida por los alrededores de la localidad de Guayabalito, en donde el área simulada fue mucho menor que la observada, siendo más notable en la simulación obtenida con el CEM 3.0. Esta diferencia se debió a que en los CEM, este tramo del río presentó una clara influencia del continuo nacional de la red hidrográfica al momento de hacer la interpolación y crear el MDE, obteniendo un desnivel muy marcado para el cauce, el cual definió claramente el tramo del río, haciendo que las diferencias de elevaciones fueran muy elevadas y por lo cual el desborde de éste no fuera posible. Esta acentuación del cauce es más definida en el CEM 3.0 por lo que con este modelo el área de inundación fue menor.

En la Figura 41 y Figura 42 se muestran las áreas de inundación obtenidas con los distintos MDE en una zona en donde se obtuvieron las máximas diferencias con respecto a las áreas de inundación observadas. La zona comprende el tramo del río La Antigua desde los alrededores de las localidades de El Arenal en el municipio de Apazapan y la localidad de Xotlilla en el municipio de Tlaltetela hasta la localidad de Nuevo Amelco, municipio de Apazapan.

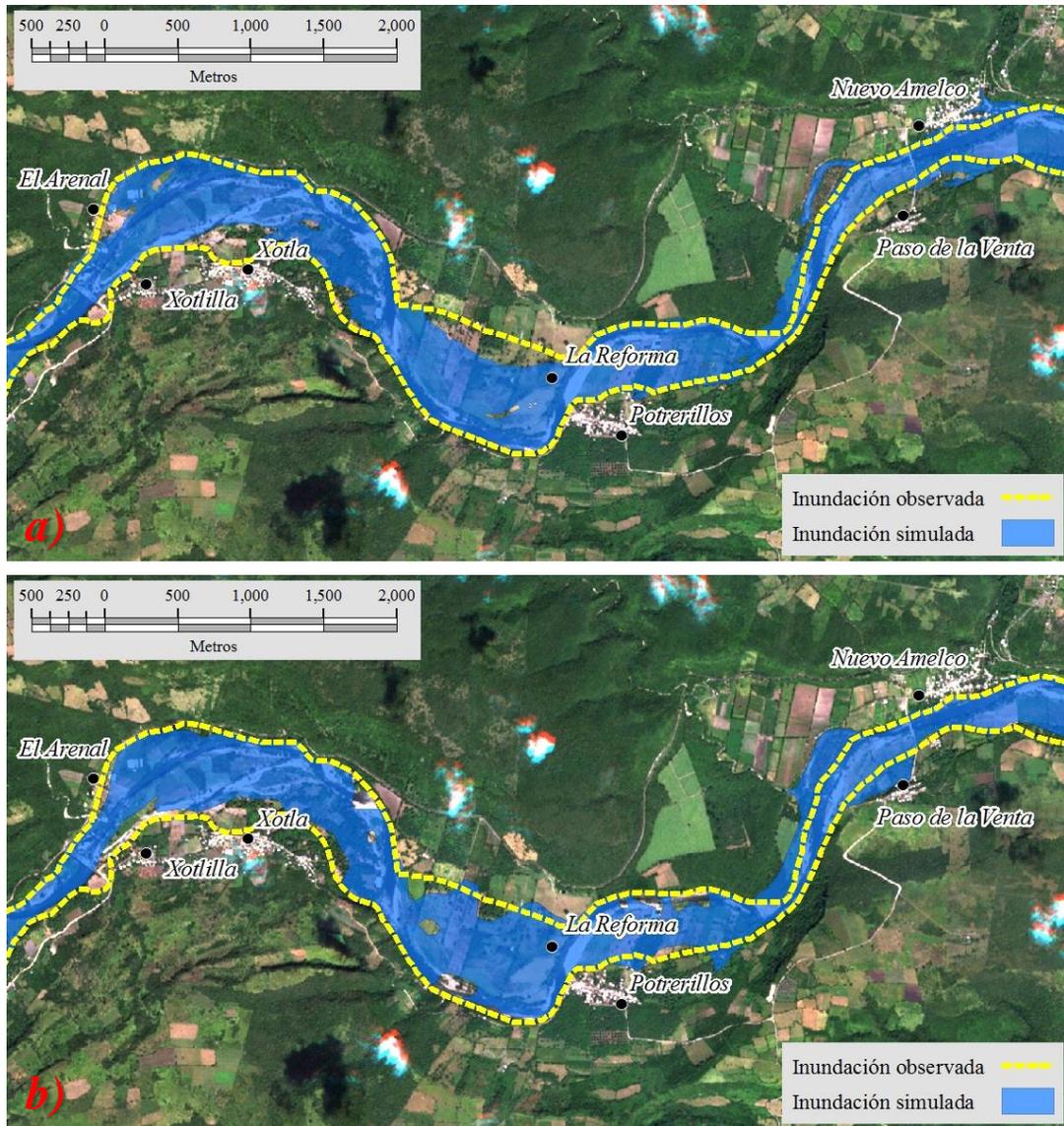


Figura 41. Detalle de las áreas de inundación obtenidas con a) cartografía LIDAR y b) MDE 1:20,000, en una de las zonas en donde se obtuvo la mayor variabilidad de las simulaciones con respecto a las inundaciones observadas.

Como se muestra en la Figura 41 a, las diferencias de las áreas de inundación obtenidas con la cartografía LIDAR y las observadas siguen siendo mínimas, lo cual demuestra la capacidad que este tipo de información tiene con respecto a la representación de la topografía incluso en áreas con poco desnivel.

Con respecto a las áreas obtenidas con el MDE 1:20,000, estas siguen siendo muy similares a las observadas aunque es evidente que presenta una mayor diferencia que las

obtenidas con la cartografía LIDAR. Las áreas simuladas conservan el trayecto y la extensión que las inundaciones observadas.



Figura 42. Detalle de las áreas de inundación obtenidas con a) CEM 3.0 y b) CEM 2.0, en una de las zonas en donde se obtuvo la mayor variabilidad de las simulaciones con respecto a las inundaciones observadas.

Las áreas simuladas con los CEM que se muestran en la Figura 42 son en donde presentaron las mayores diferencias con respecto a las áreas de inundación observadas, y es en esta zona en donde se aprecia de mejor manera el efecto de la acentuación del cauce por

la interpolación con el continuo nacional de la red hidrográfica, disminuyendo considerablemente el área de inundación.

En general, las principales diferencias fueron en las zonas con pocos cambios de elevación como las que se encuentran dentro de los cauces, los cuales no son adecuadamente representadas por el MDE 1:20,000 debido a que este fue creado solamente con curvas de nivel con equidistancias de 10 m de altitud y sin tomar en consideración puntos acotados como bancos de nivel y vértices geodésicos además de las corrientes y cuerpos de agua, y en el caso del CEM 2.0 por su escala de representación.

El problema detectado con el CEM 2.0 y 3.0 y lo cual marco una notable diferencia en cuanto a las áreas de inundación simuladas fue que en varios tramos de los cauces existía una definición exagerada del mismo, esto es, al realizar la interpolación con la cual se generaron los CEM, se apoyaron con cuerpos de agua, red hidrográfica, bancos de nivel y vértices geodésicos, lo cual hizo que en esas zonas la tendencia de las elevaciones se vieran fuertemente modificadas a ese tipos de rasgos, aumentando considerablemente las profundidades en el caso de ríos y cuerpos de agua, llegando a obtener valores menores a 0 m.

Además de la inadecuada representación del terreno por parte de los MDE 1:20,000 y CEM 2.0 en las zonas de planicies o llanuras, el modelo HEC-RAS al ser de tipo unidimensional presenta una mayor incertidumbre en la modelación de estas áreas, por lo cual estas zonas son las que llegan a presentar la mayor variabilidad en cuanto a su simulación.

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las simulaciones con MDE provenientes de cartografía LIDAR fueron las que tuvieron una mayor coincidencia con las áreas observadas, sin embargo, este tipo de información solo se encuentra disponible para ciertas áreas de la República Mexicana por lo cual debido a los resultados obtenidos se puede utilizar información 1:20,000 como una alternativa.

A pesar de que la información con la cual se creó el MDE 1:20,000 corresponde a curvas de nivel con equidistancias de 10 m y a que las direcciones de flujo obtenidas para las simulaciones de inundación fueran las que obtuvieron las mayores diferencias en su trayecto con respecto a la de los demás MDE, el MDE 1:20,000 presentó simulaciones más similares a las observadas que las obtenidas con los CEM 2.0 y 3.0.

El CEM 3.0 presentó mayores problemas con los fondos de los cauces que cualquiera de los otros MDE, siendo esto lo que más definió su poca capacidad para la delimitación de áreas de inundación.

El CEM 2.0 actualmente ya no se encuentra disponible para su descarga en la página de internet del INEGI debido a que fue reemplazado por el CEM 3.0, sin embargo las áreas de inundación que se obtuvieron con este MDE tuvieron mayores similitudes con respecto a las áreas de inundación observadas o a las obtenidas con la cartografía LIDAR que las simuladas con el CEM 3.0.

La simulación de inundaciones con cartografía LIDAR de acuerdo a su precisión sería muy apropiada para cuestiones de cuantificación de áreas afectadas, mientras que para MDE provenientes de curvas de nivel 1:20,000 su uso sería más enfocado a elaboración de mapas de riesgo.

Los CEM 2.0 y 3.0 a pesar de que son los únicos que se encuentran disponibles para toda la República Mexicana presentaron diferencias considerables en cuanto a la simulación de inundaciones tanto en su distribución como en sus superficies, por lo cual, se recomienda

ser precavidos en cuanto a su uso al momento de realizar simulaciones de inundaciones siendo estas de preferencia enfocadas a mapas de riesgo.

Al generar el MDE con las curvas de nivel 1:20,000 es necesario el uso de información topográfica auxiliar (seccionamiento de los cauces, bancos de nivel, elevaciones de los cauces, etc.) con la finalidad de corregir problemas en las áreas de poca variabilidad altitudinal y de esta manera mejorar considerablemente la precisión del MDE.

Cuando sea requerido aumentar el número de secciones para obtener una mayor estabilidad al momento de realizar las simulaciones en HEC-RAS, se recomienda no utilizar las secciones interpoladas dentro del mismo programa, sino regresar a ArcMap y con la herramienta de HEC-geoRAS obtener las elevaciones del MDE original para las nuevas secciones. Así también, es importante no cometer el error de obtener las elevaciones para las secciones a través del MDE producto de la extensión *Fill Sinks*, ya que esto genera diferencias muy significativas en las elevaciones, modificando por completo las secciones originales.

LITERATURA CITADA

- Álvarez C. I. J., Pedrozo A. A., Rodríguez R. J. P., Enriquez C., Mariño T. I. y González V. F. J., 2012. Evaluación de la incertidumbre en la modelación numérica de flujos de inundación, XXV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, San José, Costa Rica.
- Aparicio, M. F. J., 1992. Fundamentos de Hidrología de Superficie. Editorial LIMUSA. México.
- Barkau R. L., 1982. Simulation of the July 1981 Flood Along the Salt River. Report for CE695BV, Special Problems in Hydraulics. Department of Civil Engineering.
- Brunner G. W., 2010, HEC-RAS River analysis system. Hydraulic Reference Manual, Version 4.1, US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, Washington, DC.
- Campillo D. P. N., 2009. Utilización de datos de lluvia distribuidos en estudios hidrológicos de inundación. Aplicación con HEC-HMS. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, España.
- CENAPRED, 2010. Características e impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la República Mexicana en el año 2009, Ciudad de México.
- CENAPRED, 2011. Metodología para la elaboración de mapas de riesgo por inundaciones en zonas urbanas, Serie Atlas Nacional de Riesgos, Fenómenos Hidrometeorológicos, México.
- Cook A. y Merwade V., 2009. Effect of topographic data, geometric configuration and modeling approach on flood inundation mapping, Journal of Hydrology, 377:131-142.
- Coppola M., 2009. Estudio hidrográfico del río Basento (Italia). Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, España.
- De Gonzalo A. C., 2011. Propuesta metodológica de modelización hidrometeorológica e hidrodinámica enfocada a la ordenación del riesgo de inundación: Aplicación a la cuenca del río Pejibaye (Costa Rica), Universidad Politécnica de Madrid, España.
- Departamento de Desarrollo Regional y Medio Ambiente (DDRMA), 1991. Desastres, Planificación y Desarrollo: Manejo de Amenazas Naturales para Reducir los Daños. Secretaría Ejecutiva para Asuntos Económicos y Sociales, Organización de los Estados Americanos. Washington, D.C.

- Estrada, S. V. y R. M. Pacheco, 2012. Modelación Hidrológica con HEC-HMS en cuencas montañosas de la región oriental de Cuba. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, XXXIII (1): 94-105.
- Flo-2D, 2007. Flo – 2D, User’s Manual, Flo – 2D Software Inc., Arizona.
- Garrido M. M., 2012. Integración de herramientas informáticas para la alerta temprana ante el peligro de inundaciones. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría. La Habana, Cuba.
- Horritt M. S, 2006. A methodology for the validation of uncertain flood inundation models, *Journal of Hydrology*, 326:153-165.
- Horritt M. S., y Bates P. D., 2001. Effects of spatial resolution on a raster based model of flood flow, *Journal of Hydrology*, 253:239-249.
- Hunter, N. M., 2007. Simple Spatially-Distributed Models for Predicting Flood Inundation: A Review. *Geomorphology*, 90(3-4), 208.
- Ibañez M. E., 2008. Validación de Modelos Digitales del Terreno de precisión a partir de datos Láser Escáner Aerotransportado; Aplicación a la Marisma del Parque Nacional de Doñana. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, España.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2010. Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM2.0). Aguascalientes, México.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2014. Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM3.0). Aguascalientes, México.
- Knight, D.W., Shiono, K., 1996. River channel and floodplain hydraulics. In: Anderson, M.G., Walling, D.E., Bates, P.D. (Eds.), *Floodplain Processes*. Wiley, Chichester, pp. 139–182.
- Martínez-Casasnovas, J.A., 1999. Modelos digitales de terreno: Estructuras de datos y aplicaciones en el análisis de formas del terreno y en Edafología. *QUADERNS DMACS Núm. 25*, Departament de Medi Ambient i Ciències del Sòl, Universitat de Lleida, Lleida.
- Naniá, L. S., 2007. Manual Básico de HEC-HMS 3.0 y HEC-GEO-HMS 1.1. Universidad de Granada, Dpto. de Mec. de Estructuras e Ingeniería Hidráulica, Área de Ingeniería Hidráulica.

- Ramos T. C. L. y Mejía M. A., 2012. Modelamiento hidráulico del río Tumbes con influencia del enso y las mareas, XXV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, San José, Costa Rica.
- Rodríguez S. E. A., González P. R. A., Medina N. M. P., Pardo C. Y. A., y Santos R. A. C., 2007. Propuesta metodológica para la generación de mapas de inundación y clasificación de zonas de amenaza. Caso de estudio en la parte baja del río Las Ceibas (Neiva Huila), Avances en Recursos Hidráulicos – No. 16, Medellín, Colombia.
- Samuels P.G., 1990. “Cross-section location in 1-D models”. In: White, W.R., Watts, J. (Eds.), 2nd International Conference on River Flood Hydraulics. Wiley, Chichester, pp. 339–350.
- Sanders B. F., 2007. Evaluation of on-line DEMs for flood inundation modeling, Advances in Water Resources, 30:1831-1843.
- Shames I. H., 1962. Mechanics of Fluids. McGraw-Hill Book Company, NY.
- Triviño, P. A., y R. S. Ortiz, 2004. Metodología para la modelación distribuida de la escorrentía superficial y la delimitación de zonas inundables en ramblas y ríos – rambla mediterráneos. Investigaciones Geográficas, 35:67-83.